



# Prognozowanie mrozoodporności w ceramice ściennej na podstawie parametrów przenoszenia wilgoci

Dr inż. Abdrahman Alsabry, Uniwersytet Zielonogórski

## 1. Wprowadzenie

Materiały budowlane w większości mają budowę kapilarno-porowatą, umożliwiającą pochłanianie wody, która może wnikać w głąb materiału wypełniając całkowicie lub tylko częściowo jego pory. Przez stan wilgotnościowy przegród budowlanych rozumie się całokształt przebiegu procesów związanych z zawilgoceniem i wysychaniem materiałów w przegrodach budowlanych.

Obecnie bardzo ważnym problemem naukowym, związanym z wiedzą o przepływach masy i energii przez przegrody budowlane, jest potrzeba analizy teoretycznej omówionych procesów z wykorzystaniem zasad termodynamiki, teorii dyfuzji i sorpcji.

W praktyce stosowany jest sposób uproszczony oceny trwałości mrozowej materiałów budowlanych na podstawie nasiąkliwości materiału budowlanego. Sposób ten nie jest jednak niezawodny, gdyż zdarza się, że materiały budowlane o większej nasiąkliwości mają większą odporność na mróz niż te, które wykazują mniejszą nasiąkliwość. W pracy [1] nasiąkliwość cegły nie powinna być wyższa niż 24%. Właściwszym kryterium jest rozkład wielkości porów [2].

Pory mogą się różnić rozmiarami, jak i kształtem, mogą być np. cylindryczne, kuliste, szczelinowe itp. W jednym ośrodku występują zwykle pory o zróżnicowanych kształtach. Przyjmując cylindryczny kształt porów mówimy o ich średnicy, a w przypadku porów szczelinowych o ich szerokości. Wielkością określającą porowatość ciała jest także efektywny promień jego porów. Zgodnie z porozumieniem IUPAC (Międzynarodowa Unia Chemii Teoretycznej i Stosowanej) pory dzielimy według ich promieni efektywnych  $r_{ef}$  na następujące grupy [3]:

- mikropory,  $60 \text{ nm} \leq r_{ef} \leq 2 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- mezopory,  $2 \text{ }\mu\text{m} < r_{ef} \leq 60 \text{ nm}$ ;
- makropory,  $60 \text{ }\mu\text{m} < r_{ef} > 2 \text{ }\mu\text{m}$ .

Natomiast według [24] należy podkreślić, że granice między poszczególnymi typami porów nie są sztywne i zależą nie tylko od geometrycznej formy porów, ale

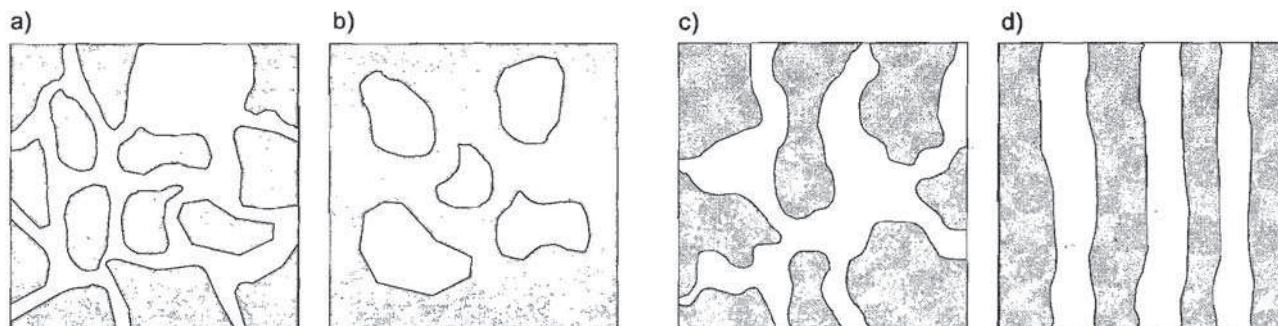
również od polarności zaadsorbowanej substancji i powierzchni pora (rys. 1).

Warto podkreślić, że porami decydującymi o właściwościach sorpcyjnych ośrodka są mikro i mezopory, które w materiałach o silnie rozwiniętej powierzchni wewnętrznej zajmują dużą część ich objętości. W niektórych materiałach ziarnistych w makroporach zawarta jest przeważająca część przestrzeni porowej. W przybliżeniu można powiedzieć, że do tej grupy materiałów należą praktycznie wszystkie ciała porowate, których powierzchnia właściwa nie przekracza  $103 \text{ m}^2/\text{kg}$ . W przypadku ceramicznych materiałów budowlanych obecność odpowiednio dużej liczby makroporów jest warunkiem koniecznym, aby dany materiał był mrozoodpornym [1].

W materiałach pochodzenia mineralnego wzrost objętości przy przechodzeniu wody w lód powoduje uszkodzenie struktury wilgotnych materiałów porowatych, a zwłaszcza przy wielokrotnym powtarzaniu cykli zamarzania i odtajania. Również zmiany objętości towarzyszące zmianie zawartości wody (skurcz lub pęcznienie) w przypadku wielokrotnego zawilgocenia i wysychania materiałów prowadzi do ich stopniowego niszczenia.

Destrukcja materiału powoduje nie tylko około 9% wzrost objętości wody z chwilą przejścia ze stanu ciekłego do stałego; mają na to wpływ również inne czynniki, m.in. dynamika transportu wody w porowatej strukturze [4]. W pracy [2] autor podaje, że sposób nasycenia się porowatego materiału budowlanego drogą adsorpcji kapilarnej daje wierniejszy obraz procesów zachodzących w tym materiale pod działaniem mrozu niż przyjęte powszechnie badania nasiąkliwości. Sugestię tę potwierdzają wyniki badań [5] prowadzonych przez zespół autorski na różnych asortymentach ceramiki budowlanej.

Zjawiska transportu wody zachodzące w porowatych materiałach budowlanych składają się na bardzo skomplikowany proces, gdyż oprócz przepływów molekularnych może występować w ich porach również dyfuzja powierzchniowa, transport kapilarny i inne rodzaje transportu. Równocześnie mogą zacho-



**Rys. 1.** Charakterystyczne typy porów: a) pory otwarte, b) pory zamknięte, c) pory złożone, d) pory ukierunkowane [26]

dzić procesy sorpcji lub desorpcji, przemiany fazowe, a w warunkach nierównowagi cieplnej zjawiska termodyfuzji. To, czy i z jaką intensywnością będą się ujawniać poszczególne zjawiska, zależy od struktury porowatości danego materiału i jego właściwości cieplno-wilgotnościowych [6, 7, 8, 9, 10].

Dla opisu niestacjonarnych współzależnych procesów przepływu ciepła i wilgoci w kapilarno-porowatych materiałach budowlanych potrzebne są następujące dane: współczynnik wyrównywania wilgotności  $D_w$ , współczynnik wchłaniania wody  $A$ , oraz rozkład objętości porów w funkcji ich promieni. Informacje o tych parametrach mogą być wykorzystane przy wyjaśnieniu przyczyny zawilgocenia konstrukcji, badaniu procesu wnikania środków konserwujących i hydrofobowych do materiałów porowatych oraz do prognozowania mrozoodporności [2] i trwałości [14]. Współczynnik wyrównywania wilgotności wyznacza się doświadczalnie, wykorzystując różne metody, których niedoskonałości powodują, że uzyskane dane obciążone są błędami. Na przykład w metodzie Brylinga [12] długość próbki prostopadłościennej powinna być większa niż wysokość podciągania kapilarnego wody, której wartość dla badanego materiału może różnić się nawet kilkakrotnie, w zależności od struktury porowatości. Według danych z pracy [13], wysokość podciągania kapilarnego w ceramice budowlanej przewyższa 50 cm, co przekracza wielkość wyrobów ceramicznych stosowanych w budownictwie, uniemożliwiając przeprowadzenie badania. W pracy [1] podano, że w ścianach wykonywanych z cegły pełnej wilgoć ta może wnieść się na wysokość nawet do 2,5 m od poziomu gruntu, przy czym na długości muru rozkład zawilgocenia może być bardzo zróżnicowany, zarówno pod względem wysokości, jak i stopnia zawilgocenia. Dość często woda kapilarna wznosi się na wysokość 0,5 do 1,5 m, a tylko miejscowo wyżej.

Ponadto, w metodzie Brylinga konieczny jest podział próbki na kilka jednakowych krążków wyciętych prostopadle do jej wysokości, co powoduje zakłócenia rzeczywistego rozkładu wilgoci. Powstają komplikacje przy różniczkowaniu krzywej doświadczalnej zmian wilgotności wzdłuż wysokości próbki. Także do wyzna-

czenia współczynnika wyrównywania wilgotności Gaffner [14] zaleca wykorzystanie próbki w kształcie belki opartej na dwóch podporach, z których jedną umieszcza się na wadze. W chwili początkowej eksperymentu końce próbki powinny mieć różną wilgotność. Od wielkości tej różnicy zależy dokładność wyznaczenia wartości liczbowej współczynnika wyrównywania wilgotności. Nie podano jednak konkretnych wskazań dotyczących wartości wilgotności końców próbki. Główną charakterystyką liczbową struktury materiałów kapilarno-porowatych jest rozkład objętości porów w funkcji ich promieni.

Od struktury porów, ich rodzaju, wielkości i formy zależą wszelkie podstawowe prawidłowości dotyczące zarówno transportu, jak i stopnia związania wody w materiale porowatym. Struktura wywiera ogromny wpływ zarówno na jakościowy, jak i ilościowy przebieg zjawisk wilgotnościowych. Do modelowania procesów przenoszenia wody i ciepła wymagana jest jednak nie tylko znajomość rozkładu, ale również rodzaju i formy porów, których udziały w danym materiale są dominujące [15].

Według [24], wilgoć wypełniająca kapilary najpierw adsorbuje się w postaci monowarstw, a następnie poliwarstw wilgoci. Charakteryzując materiały z tego punktu widzenia, warto znać procentowe zawartości wilgoci w porach o różnych średnicach. Rozkłady te (rys. 2) dla typowych materiałów budowlanych są prezentowane w pracach Kunzela [25] i Krusa [26].

Dla cegły charakterystyczne są stosunkowo licznie występujące wydłużone pory (kapilary) o kształcie rurowym, które wpływają na transport wody, a co za tym idzie, uniemożliwiają wystąpienie lokalnych różnic wilgotności.

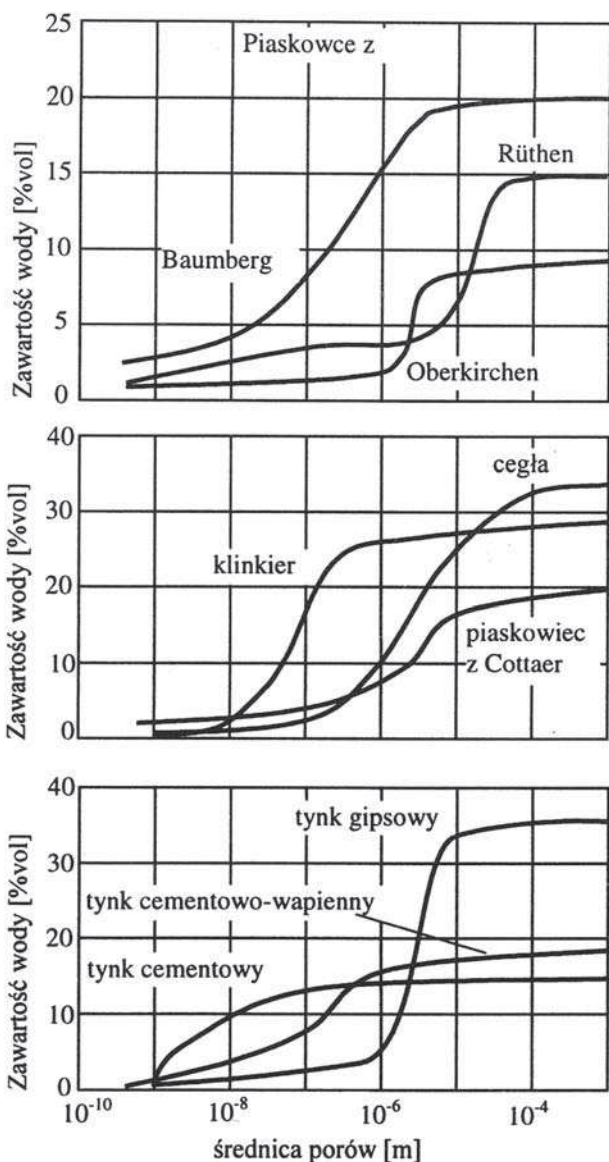
Doświadczalne określenie rozkładu rozmiarów porów wymaga zastosowania kosztownej aparatury. W artykule przedstawiono obliczeniową metodę wyznaczenia współczynników: wyrównywania wilgotności, wchłaniania wody, oraz rozkładu objętości porów w funkcji ich promieni, na podstawie danych o szybkości jednokierunkowego podciągania kapilarnego. Przeprowadzone doświadczenie objęło wykonanie pomiarów, zmiennej w czasie, masy próbki materiału.



## 2. Opis eksperymentu

Przeprowadzone doświadczenie dotyczyło współczynnika wchłaniania wody A zdefiniowanego w normie PN-EN ISO 9346 [16]. W trakcie doświadczenia próbki były tak ustawione, aby dolną powierzchnią stykały się z lustrem wody. Ściana górna i ściany boczne próbek były izolowane.

Pomiar współczynnika wchłaniania wody sprowadza się do rejestracji zmieniającej się masy próbki w wyniku kapilarnego podciągania wody. Próbkę stanowiło 1/2 cegły budowlanej o wymiarach 5,8×6,5×25 cm, 1/2 cegły klinkierowej czerwonej o wymiarach 5,8×6,5×25 cm oraz 1/2 cegły klinkierowej żółtej o wymiarach 5,8×6,5×25 cm. Próbki zostały wysuszone do stałej masy w temperaturze  $T=105^{\circ}\text{C} \div 110^{\circ}\text{C}$ . Bezpośrednio po ochłodzeniu wszystkie powierzchnie prostopadłościennych próbek, z wyjątkiem dolnej podstawy,



Rys. 2. Zawartość wilgoci w materiałach budowlanych w zależności od średnicy porów [25, 26]

pokryto preparatem uniemożliwiającym wymianę wilgoci z otoczeniem w celu zabezpieczenia przed niekontrolowanym wysychaniem w trakcie prowadzenia pomiarów.

Po wyznaczeniu masy początkowej, próbki wstawiono do kuwety z wodą. W trakcie doświadczenia utrzymywano stałe zanurzenie próbek wynoszące 5 mm ±2 mm. Utrzymywano również niezmienną wilgotność względną i temperaturę w komorze klimatycznej ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=60\%$ ). Umieszczenie próbek w kuwecie stanowiło rozpoczęcie pomiarów. W ustalonych odstępach czasu próbki wyciągano z wody, ważono na wadze z dokładnością do 0,1 g i umieszczano z powrotem na stanowisku pomiarowym. Pomiar prowadzono początkowo co godzinę, później co kilka godzin, a następnie w odstępach kilkunastu godzin. Pomiar prowadzono do czasu, po którym masy próbek nie uległy zmianie (materiał jest w stanie maksymalnego nasycenia wodą). Na rysunku 3 pokazano wyniki pomiarów oraz obliczeń na podstawie opisu matematycznego zmian masy próbek w czasie.

## 3. Ocena współczynnika przepływu wilgoci

### 3.1. Sformułowanie zagadnienia

Niestacjonarny, jednokierunkowy ruch wilgoci opisany jest równaniem dyfuzji [12,14]:

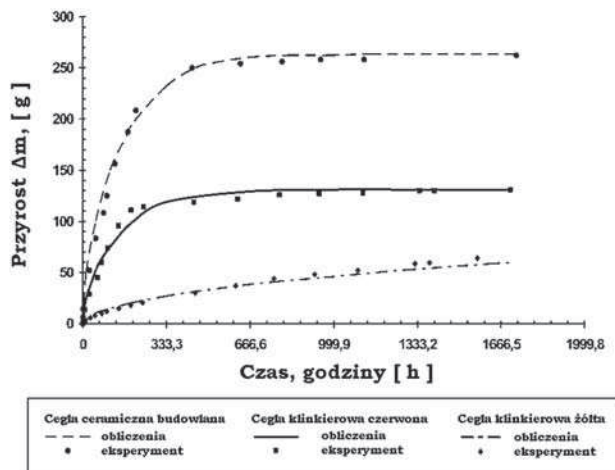
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_w \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1)$$

w którym:

$u=u(x, t)$  oznacza masową zawartość wilgoci na jednostkę masy materiału, zależną od współrzędnej  $x$  i czasu  $t$ ,

$D_w$  – to współczynnik wyrównywania wilgotności.

Aby rozwiązać równanie (1) należy przyjąć odpowiednie warunki początkowe oraz warunki brzegowe na powierzchniach próbki.



Rys. 3. Przyrost masy próbki w czasie



Warunek początkowy oznacza, że próbka o wysokości  $L$  w chwili początkowej (przy  $t=0$ ) jest sucha

$$u(x,0)=0, \quad 0 < x \leq L, \quad t=0 \quad (2)$$

Na górnej, zaizolowanej powierzchni próbki nie przepływa wilgoć, a więc wektor gęstości strumienia wilgoci jest równy 0.

$$-D_w \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad x=L \quad i \quad t \geq 0 \quad (3)$$

gdzie:

$w = \rho_m \cdot u$  – to masowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości materiału o gęstości pozornej.

Na dolnej powierzchni próbki materiał znajduje się w stanie maksymalnego nasycenia wodą (stopień nasycenia  $s=1$ )

$$u(x,t) = u_{max} \quad x=0 \quad t \geq 0 \quad (4)$$

gdzie:

$u_{max}$  – to masowa zawartość wody w stanie maksymalnego nasycenia materiału na jednostkę masy materiału. Jej wartość można określić jako nasiąkliwość lub obliczając iloraz maksymalnego przyrostu masy do początkowej masy próbki.

Jeśli funkcja  $u(x,t)$  jest znana, to zmianę masy próbki w czasie można określić na podstawie równania

$$m(t) - m_0 = \rho_m \cdot \int_0^L u(x,t) dx \quad (5)$$

gdzie:  $m_0$  – masa początkowa próbki w czasie  $t=0$ ;

$\rho_m$  – gęstość pozorna materiału,

$S$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki. Sformułowane zagadnienie polega na wyznaczeniu nieznanej funkcji  $D_w$  na podstawie wzorów (1–5).

## 4. Rozkład objętości porów w funkcji promienia

### 4.1. Opis matematyczny

Przy znanej funkcji  $D_w$  można określić różniczkową funkcję rozkładu objętości porów po promieniu  $f_v$  na podstawie zależności ustalonej w pracy [17]

$$D_w = \frac{\sigma \cdot \psi \cdot \cos \theta}{\rho_w \cdot v \cdot \xi(\psi) \cdot S_v^2(r_u) \cdot f_v(r_u) \cdot r_u^2} \quad (6)$$

gdzie:

$\sigma$  – napięcie powierzchniowe między fazą ciekłą i gazową;

$\psi$  – objętościowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości materiału;

$\theta$  – kąt zetknięcia się (zwilżenia) fazy stałej i ciekłej;

$\rho_w$  – gęstość wody;

$v$  – lepkość kinematyczna wilgoci;

$\xi$  – współczynnik kształtu kapilary,

$S_v$  – pole powierzchni kapilar w jednostce objętości materiału (pole kontaktu ze szkieletem materiału);

$f_v$  – różniczkowa funkcja rozkładu objętości porów po promieniu;

$r_u$  – maksymalny promień kapilar, w których są meniski przy zawartości wilgoci.

Wartości  $\psi$ ,  $r_u$ ,  $S_v$  i  $\xi$  określamy wykorzystując wzory:

$$\psi = \frac{\rho_m}{\rho_w} u \quad (7)$$

$$\psi = \int_0^{r_u} f_v(r) dr \quad (8)$$

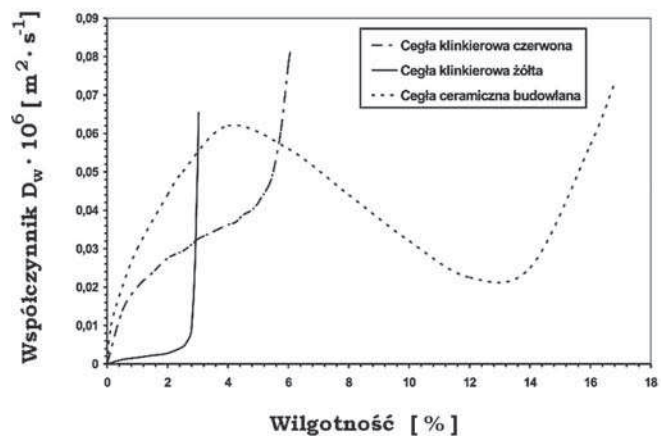
$$S_v(r_u) = 2 \int_0^{r_u} \frac{f_v(r)}{r} dr \quad (9)$$

$$\xi(\psi) = \psi \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[ \frac{\arcsin(2\psi - 1)}{3} \right] \right\}^{-2} \quad (10)$$

Ze wzorów (6–10) wynika, że wartość współczynnika  $D_w$ , który przy danej zawartości wilgoci  $u$  zależy tylko od wartości funkcji  $f_v$  w przedziale promienia od 0 do  $r_u$  i odwrotnie, wartość funkcji  $f_v$  przy danym promieniu  $r_u$  zależy tylko od wartości współczynnika  $D_w$  w przedziale zawartości wilgoci od 0 do  $u$ .

## 5. Wyniki analizy obliczeniowej

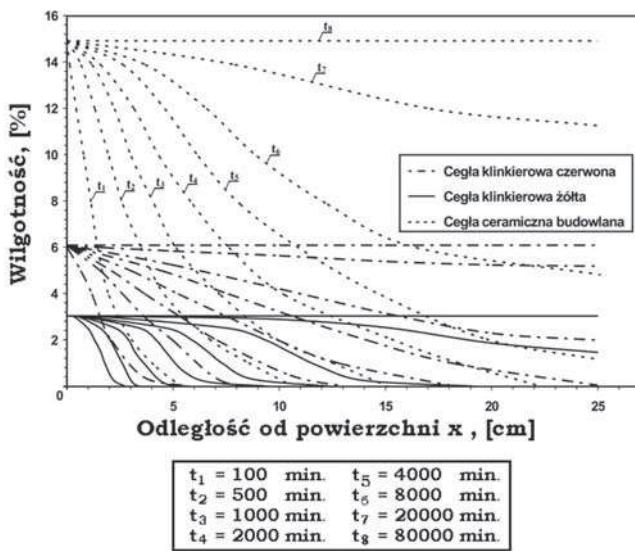
Proces podciągania kapilarnego wody w wyrobach ceramicznych poddano analizie obliczeniowej według przedstawionego opisu matematycznego (1–10), zrealizowanego w programie komputerowym BPUT opracowanym przez autorów pracy [17]. W programie od początku zadawano funkcję  $D_w$ . Pierwszą postacią funkcji określono na podstawie danych literaturowych [19, 20, 21] oraz własnych doświadczeń. Przy znanej funkcji  $D_w$  rozwiązywano równanie (1) z warunkami (2–4) i określono funkcję  $u(x,t)$ . Znaleziono rozwiązanie



**Rys. 4.** Zależność wartości współczynnika wyrównywania wilgotności w próbce



$u(x,t)$  całkowano zgodnie z równaniem (5) i wyznaczono zmianę masy próbki w czasie  $\Delta m = m(t) - m_0$ . Uzyskaną krzywą  $\Delta m(t)$  porównywano z danymi doświadczalnymi i jeżeli wyniki tego porównania nie były zbieżne, zmieniano wartość funkcji  $D_w$  i ponownie wykonano obliczenia. Procedurę powtarzano do momentu, w którym wyniki uzyskane w sposób doświadczalny i obliczeniowy były zbliżone. Ostatecznie uzyskane wyniki pokazano na rysunkach 3, 4, 5, 6. Rysunek 4 przedstawia zmiany wartości współczynnika wyrównywania wilgotności  $D_w$ , w zależności od stopnia zawilgocenia próbki. Postać tej zależności ma wygląd jak w metodzie Brylinga.



Rys. 5. Zmiany wilgotności próbki na jej wysokościach w zależności od czasu

Na rysunku 5 przedstawiona została wilgotność masowa w zależności od współrzędnej ( $x$ ) zmienia się ( $0 \div x$ ) oraz czasu ( $t$ ). Prawdopodobnie ta pozostaje w zgodzie z wynikami innych badań, np. [22].

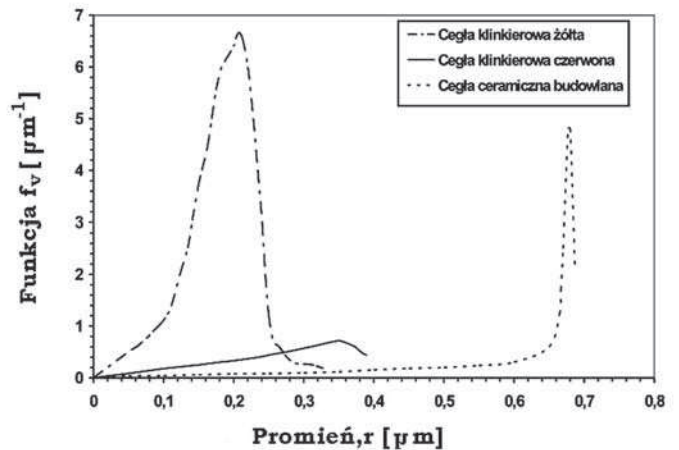
W programie BPUT [17] opracowano algorytm odnowienia (odtworzenia) funkcji  $f_v$  na podstawie zadanych wartości współczynnika  $D_w$ . Zmieniano promień kapilary materiału  $r_u$  począwszy od 0 ze stałym krokiem  $\Delta r$  i na każdym  $i$ -tym kroku obliczono wartości funkcji  $f_{vi}$ , rozwiązując za pomocą metody Newtona równanie:

$$D_w^a(u_i(f_{vi})) - D_w^b(f_{vi}) = 0 \quad (11)$$

gdzie:  $D_w^a$  jest wynikiem rozwiązania zagadnienia (1-5),  $D_w^b$  jest wynikiem rozwiązania równań (6-10).

Rysunek 6 prezentuje różniczkową funkcję rozkładu objętości porów po promieniu  $f_v$  obliczoną za pomocą tego algorytmu.

Do scharakteryzowania procesu podciągania kapilarnego wody wykorzystuje się zazwyczaj współczyn-



Rys. 6. Rozkład objętości por w funkcji promienia

nik wchłaniania wody  $A$ . Wyznaczono go ze wzoru w postaci:

$$A = \frac{\Delta m}{S\sqrt{t}} \quad (12)$$

Wartość współczynnika  $A$  oblicza się na podstawie danych przedstawionych na rysunku 2.

Otrzymano następujące wartości:

Cegła budowlana  $A = 0,065 \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$

Cegła klinkierowa czerwona  $A = 0,0424 \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$

cegła klinkierowa żółta  $A = 0,00753 \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$

Zbliżone wartości podają Mukhopadhyaya i inni [21]. Badali oni wpływ temperatury powietrza na współczynnik wchłaniania  $A$  próbki z cegły ceramicznej czerwonej o wymiarach  $50 \times 50 \times 20$  mm i  $\rho = 1980$  kg/m<sup>3</sup> oraz masowej zawartości wody w jednostce objętości materiału 188 kg/m<sup>3</sup>. Porowatość aktywna wyniosła 0,188, natomiast średnia wartość  $A$  w temperaturze powietrza 21°C wyniosła

$$A = 0,084 \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$$

W literaturze [23] przeprowadzono eksperyment, w którym wykorzystano dwie ceramiczne próbki prostopadłościowe o wysokości  $L = 25$  cm i polu powierzchni podstawy  $S = 23$  cm<sup>2</sup>. Próbkę wykonano z masy ceramicznej składającej się z itu z Lewkowa Starego, a następnie wysuszone i wypalono. W temperaturze 950°C wartość współczynnika wchłaniania wody wyniosła



$$A = 0,190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{s}}$$

natomiast w temperaturze wypalenia 1050°C, współczynnik wchłaniania wody wyniósł

$$A = 0,139 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{s}}$$

Natomiast Pavlik i inni badali ceramikę ścienną o  $\rho = 1776 \text{ kg/m}^3$ , uzyskując współczynnik wchłaniania wody

$$A = 0,124 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{s}}$$

Na podstawie badań własnych i badań wymienionych autorów można stwierdzić, że współczynnik wchłaniania wody  $A$  zawiera się w granicach ( $0,00753 \div 0,190$ ). Stąd wniosek, że współczynnik wchłaniania wody  $A$  zależy od charakteru struktury porowatości materiału, od składu masy ceramicznej, a także od czynników technologicznych, np. formowania. Na podstawie badania porozymetrią rtęciową uzyskałem porowatość otwartą dla cegły ceramicznej budowlanej równą  $0,3345 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . W literaturze [16] podano zależność dla porowatości aktywnej, która bierze udział w kapilarnym wchłanianiu wilgoci w postaci:

$$\phi_a = \frac{A\sqrt{t_c}}{\rho_w l}$$

gdzie:  $t_c$  – czas kapilarnego pochłaniania wody,  $s$ ,  $l$  – długość próbki,  $m$ .

Dla cegły ceramicznej budowlanej,

$$\phi_a = \frac{A\sqrt{t_c}}{\rho_w l} = \frac{0,065 \cdot 17 \cdot 60}{1000 \cdot 0,25} = 0,259 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Stosunek porowatości aktywnej do porowatości otwartej wynosi  $0,259/0,3345=0,77=77\%$ .

Dla próbki cegły klinkierowej żółtej porowatość aktywna równa się  $\phi_a=0,0633 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , a na podstawie eksperymentu porowatość otwarta równa się  $0,133 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Zaś stosunek porowatości aktywnej do porowatości otwartej wynosi 48%.

Natomiast dla próbki cegły ceramicznej klinkierowej czerwonej  $\phi_a=0,122 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , a na podstawie eksperymentu równa jest  $0,1747 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , zaś stosunek porowatości aktywnej do porowatości otwartej wynosi 70%. Na podstawie przytoczonych wyników można stwierdzić, że cegła klinkierowa żółta posiada dużo rezerwowych porów, czyli wykazuje większą mrozoodporność i trwałość. Jednocześnie można stwierdzić, że im mniejsza jest wartość współczyn-

nika wchłaniania wody  $A$ , tym mniejszy jest średni promień porów (rys. 1, 4), które biorą udział w procesie podciągania kapilarnego wody, np. dla cegły klinkierowej żółtej średni promień kapilarny równa się  $18 \mu\text{m}$  lub  $0,018 \mu\text{m}$ , w takich porach woda nie zamarza. W cegle klinkierowej czerwonej współczynnik wchłaniania wody  $A = 0,0424$  wzrasta 5,5 razy, jednocześnie średni promień porów biorących udział w podciąganiu wody równy jest  $0,25 \mu\text{m}$ , jest 14 razy większy niż w cegle żółtej, stąd jego mniejsza mrozoodporność i trwałość. W cegle ceramicznej budowlanej współczynnik wchłaniania wody  $A = 0,065$ , a średni promień porów biorących udział w procesie podciągania kapilarnego wody –  $0,58 \mu\text{m}$ . Stąd wynika, że ten promień wzrasta w porównaniu z cegłą klinkierową czerwoną ponad dwukrotnie.

## 6. Zakończenie

Z prowadzonych badań wynika, że na podstawie analizy kinetycznej podciągania kapilarnego wody można wyznaczyć współczynnik wyrównywania wilgotności  $D_w$ , współczynnik wchłaniania wody  $A$ , oraz rozkład objętości porów w funkcji ich promieni, które można wykorzystać w obliczeniach zawilgocenia w przegrodach budowlanych i prognozowaniu mrozoodporności i trwałości materiałów budowlanych. Ustalono, że ze wzrostem wartości współczynnika wchłaniania wody  $A$ , wzrasta wartość współczynnika wyrównywania wilgotności  $D_w$  oraz wzrasta wartość średniego promienia porów biorących udział w podciąganiu kapilarnym. Wartość współczynnika pochłaniania wody  $A$  można zmieniać na podstawie wielu czynników technologicznych.

Metodę cechują następujące zalety:

- eksperyment nie wymaga specjalistycznej aparatury,
- wykorzystując jedną próbkę można uzyskać dostateczną liczbę danych doświadczalnych,
- możliwe jest kilkakrotne badanie próbki, na przykład po wielokrotnym oddziaływaniu wilgoci lub ujemnych temperatur, i możliwe są obserwacje wpływu czynników na strukturę materiału, a także na charakter zmian współczynnika migracji wilgoci.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Bezpalko N., Zastosowanie techniki TDR do badania procesów przenoszenia masy i energii przez wybrane przegrody budowlane, Praca doktorska, Lublin 2009
- [2] Żygadło M., Piasta Z., Prognozowanie mrozoodporności ceramicznych materiałów budowlanych na podstawie ich właściwości kapilarnych, Inżynieria i Budownictwo, 2/1989, s. 56–57
- [3] Demichowacz-Pigoniowa J., Obliczenia fizykochemiczne. Część I. Termodynamika chemiczna i nauka o fazach, Wrocław 1975
- [4] Hynes J. M.: Frost action as capillary effect. " Trans. Brit. Ceram. Soc.", nr 11/1964
- [5] Żygadło M., Lenarcik A., Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej, seria ITK ROS nr 1544/24. Politechnika Świętokrzyska, 1987
- [6] Bogosłowski W., Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach, Arkady, Warszawa 1989



[7] Gawin D., Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepło-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych. Zeszyty Naukowe Nr 853, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000

[8] Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J., Fizyka budowli. Wybrane zagadnienia. Białystok 2000

[9] Klemm P., [i in.], Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych, t. 4, Politechnika Łódzka, Łódź 1994

[10] Wyrwał J., Świrska J., Problemy zawilgocenia przegród budowlanych, Warszawa 1998

[11] Bochen J.: „Ocena trwałości mineralnych tynków elewacyjnych na podstawie zmiany ich porowatości w warunkach przyspieszonego starzenia. Materiały Konferencyjne IX Konferencji Naukowo-Technicznej „Fizyka budowli w teorii i praktyce”, Łódź, 2003, s. 67–71

[12] Fokin K. F., Stroitel'naja teplotiechnika ograzhdajuszczich czastiej zdaniy; Strojizdat, Moskwa, 1973

[13] Wesołowska M., Wpływ krętości kapilar na proces wnikania wody w materiale ceramicznym, Materiały Konferencyjne IX Konferencji Naukowo-Technicznej „Fizyka Budowli w teorii i praktyce” Część 2; Łódź, 2003, s. 705–711

[14] Wyrwał J., Świrska J., Problemy zawilgocenia przegród budowlanych, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, IPPT, Warszawa, 1998

[15] PN-EN ISO 9346 Izolacja cieplna – Wymiana masy – Wielkości fizyczne i definicje

[16] Afonin A. V., Nikitin V. I., Wyzczenie koefficientow perenosa zhidkoj vlagi v kapilarno-poristych stroitel'nyh materialach, Vestnik Brestkogo GTU „Stroitel'stvo i architektura”, 1(13); Brześć, 2002, s. 10–15

[17] Afonin A., Nikitin V., Szabanov D., Ocenka parametrov vlagoprovodnosti stroitel'nyh materialov dla teplotiechniceskih rasczotov, Vestnik BGTU „Vodohoziajstviennoje stroitel'stvo, teploenergetika, ekologija, 2(20); Brześć, 2003, s. 98–100

[18] Janz M., „Methods measuring the moisture diffusivity at high moisture levels” Report TVBM –3076, Lund, 1997

[19] Kunzel, H. M., Simultaneous heat and moisture transport in building component – one – and dimensional calculation using simple parameters, IRB Verlag, Stuttgart

[20] Mukhopadhyaya P., Kumaran K., Normandin N., Goudreau P., Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials, Journal of Thermal Envelope and Building Science, v. 26, no. 2, Oct. 2002, p. 179–195

[21] Płoński W., Problem wilgoci w przegrodach budowlanych, Wydawnictwo Arkady, ITB Warszawa, 1968

[22] Nikitin V., Backiel-Brzozowska B., Boltryk M., „Eksperymentalno-obliczeniowa metoda wyznaczania współczynników migracji wilgoci i parametrów struktury porowatości ceramiki budowlanej”, Polski Biuletyn Ceramiczny, 81; Kraków 2004, w druku

[23] Pavlik Z., Madera J., Cerny R., „Inverse modeling of thermal and hygric properties of building materials based on a semi-scale experiment”

[24] Kubik J., Przepływ wilgoci w materiałach budowlanych, Opole 2000

[25] Kunzel H. M., Verfahren zur ein-und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme-und Feuchtetransport in Bauteilen mit einfachen Kennwerten (dissertation), Uni Stuttgart 1994

[25] Kurs M., Feuchtetransport und Speicherkoeffizienten poroser mineralischer Baustoffe ....( dissertation), Uni Stuttgart 1994

[26] Kubik J., Wyrwał J., Podstawy fizyki materiałów budowlanych. Budownictwo ogólne, fizyki budowli, tom 2

# KALENDARZ BUDOWLANY 2011

## Kalendarz Budowlany 2011

pod redakcją prof. dr. hab. inż. Leonarda Runkiewicza.

ukaze się w listopadzie 2010 r., w formacie A5 (szyty).

CZĘŚĆ I: kalendarium oraz wiadomości ogólne

CZĘŚĆ II: **Poradnik techniczny** opracowany przez wybitnych specjalistów z dziedziny budownictwa, zawiera rozdziały: obowiązki inwestora i wykonawcy w procesie budowlanym • normy w budownictwie • wprowadzanie wyrobów i elementów budowlanych do obrotu i ich stosowanie • warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie • projektowanie konstrukcji z betonu wg eurokodu 2 • beton • kruszywa budowlane – normy, badania, systemy zgodności • projektowanie konstrukcji drewnianych wg eurokodu 5 • projektowanie konstrukcji murowych wg eurokodu 6 • fundamenty – projektowanie i wzmacnianie • schody i pochylnie • instalacje elektryczne w budynkach mieszkalnych • rusztowania budowlane • naprawy i ochrona konstrukcji żelbetowych • ocena stanu technicznego i zagrożeń bezpieczeństwa stalowych obiektów wieloprzestrzennych • zabezpieczenia wodochronne budynków • zasady bezpieczeństwa pożarowego budynków • zagadnienia akustyczne w budynkach mieszkalnych • nadawanie uprawnień budowlanych • rzeczoznawstwo budowlane • kształcenie ustawiczne inżynierów budownictwa.

### KALENDARZ BUDOWLANY 2011 można zamawiać:

- pocztą (WACETOB, ul. Olesińska 21, 02-548 Warszawa)
- telefonicznie lub fax'em 22 622-01-71, 22 625-78-07
- e-mail'em: [ks@budowlana.pl](mailto:ks@budowlana.pl)
- na naszej stronie internetowej: [www.wacetob.com.pl](http://www.wacetob.com.pl)
- lub zakupić w Księgarni Budowlanej WACETOB

## ZAMÓWIENIE • KALENDARZ BUDOWLANY 2011

..... egz. x 52 zł/1 egz. (+ koszty wysyłki)\*

Wydawnictwo proszę wysłać na adres:

Nazwa: .....

Ul.....

Kod ..... - ..... Miejscowość.....

NIP ..... tel. ....

(do FAKTURY)

(podpis)

\*Kalendarz Budowlany 2011 wysyłamy za zaliczeniem pocztowym (płatne przy odbiorze) – koszty wysyłki wg cennika Poczty Polskiej



WACETOB • KSIĘGARNIA BUDOWLANA • 02-548 WARSZAWA • UL.OLESIŃSKA 21  
ksiegarnia.budowlana.pl