

# OCENA ZDOLNOŚCI WYROBÓW WAPIENNO-PIASKOWYCH DO PRZECIWSZTAWIANIA SIĘ WNIKANIU WODY

Vadim NIKITSIN, Beata BACKIEL-BRZOZOWSKA\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W pracy zaproponowano zastosowanie współczynnika oporu penetracji wody  $M$  lub promienia ekwiwalentnego kapilary  $r_e$  do scharakteryzowania zdolności materiału do przeciwstawiania się wnikaniu wody. Opisano metodę wyznaczania tych wskaźników bazującą na wynikach eksperymentu, polegającego na monitorowaniu jednostkowego wchłaniania wody przez próbki materiału. Jako próbki zastosowano wyroby wapienno-piaskowe wyprodukowane w trzech przedsiębiorstwach. Przeprowadzono statystyczną analizę wpływu trzech jakościowych czynników charakteryzujących właściwości technologiczne przedsiębiorstw na wartość współczynnika  $M$ . Pokazano, że dane porozymetrii rtęciowej nie mogą być zastosowane do wyznaczania współczynnika  $M$ . Opisano procedurę wyznaczania średniego promienia kapilar z uwzględnieniem ich krętości.

*Słowa kluczowe:* wyroby wapienno-piaskowe, współczynnik oporu penetracji wody, analiza statystyczna.

## 1. Wprowadzenie

Mrozoodporność oraz inne charakterystyki trwałości porowatych materiałów ściennych eksploatowanych w warunkach intensywnego oddziaływania wilgoci w znacznym stopniu zależą od zdolności materiału do przeciwstawiania się procesowi wnikania wody. Własność ta, w pierwszej kolejności, zależy od objętości i charakteru przestrzeni porowej. Do opisanego skomplikowanej struktury porowatości tworzyw stosuje się zwykle metody porozymetryczne lub absorpcyjne oparte na założeniu, że przestrzeń porów składa się z kapilar walcowych. Przyjęty model nie opisuje złożonej struktury porowatości tworzyw, dlatego wyznaczane parametry mają charakter warunkowy, co uniemożliwia pełną ocenę właściwości kapilarnych materiału.

Uwzględniając stronę fizyczną zjawiska podciągania kapilarnego wilgoci zaproponowano w pracy zastosowanie współczynnika penetracji wody  $M$  lub promienia ekwiwalentnego kapilary  $r_e$  w celu scharakteryzowania zdolności materiału do przeciwstawiania się wnikaniu wody. Opisano metodę wyznaczania tych wskaźników, bazującą na wynikach eksperymentu polegającego na monitorowaniu jednostkowego wchłaniania wody przez próbki materiału. Jako próbki zastosowano wyroby wapienno-piaskowe wyprodukowane w trzech przedsiębiorstwach. Przeprowadzono analizę statystyczną wpływu trzech jakościowych czynników technologicznych na wartość współczynnika  $M$ . Pokazano, że dane porozymetrii rtęciowej nie powinny być stosowane do wyznaczania

współczynnika  $M$ . Opisano procedurę wyznaczania średniego promienia kapilar z uwzględnieniem ich krętości.

## 2. Opis fizyki zjawiska kapilarnego podciągania wody

Według podstawowej teorii kapilarnej proces wchłaniania wody w poziomej kapilarze cylindrycznej materiału hydrofilowego opisano zależnością pokazaną między innymi w pracach (Janz, 1997; Pogorzelski, 1987; Żygadło i Piasta, 1989)

$$\tau = \frac{2\eta}{r_o \sigma \cos \theta} x^2 \quad (1)$$

gdzie  $\tau$  oznacza czas trwania procesu od momentu kontaktu kapilary z wodą,  $x$  oznacza drogę, którą front wody przebył w kapilarze w czasie  $\tau$ ,  $r_o$  jest promieniem kapilary,  $\theta$  jest to napięcie powierzchniowe,  $\eta$  oznacza kąta zwilżania, oznacza lepkość dynamiczną wody. Zależność (1) bez dużych błędów można stosować w odniesieniu do kapilary pionowej, kiedy wysokość słupka wody  $x$  jest znacznie mniejsza od maksymalnej wysokości podciągania danej kapilary  $h_{max}$ . Ze wzoru (1) wynika, że czas oraz kwadrat wysokości są związane zależnością liniową, w której współczynnik proporcjonalności  $M$  charakteryzuje zdolność kapilary o promieniu  $r_o$  do przeciwstawiania się penetracji wody:

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: b.backiel@pb.edu.pl

$$M_o = \frac{2\eta}{r_o \sigma \cos \theta} \quad (2)$$

Opór rośnie przy wzroście lepkości dynamicznej wody i kąta zwilżania oraz przy spadku promienia kapilary i napięcia powierzchniowego.

Jak pokazuje praktyka w odniesieniu do tworzyw ceramicznych oraz do innych materiałów kapilarno-porowatych można, z pewnym przybliżeniem, stosować analogiczną zależność.

$$\tau = Mx^2 \quad (3)$$

w której  $x$  jest wysokością, do której front wody przeniknie w czasie  $\tau$  od momentu kontaktu próbki materiału z wodą. W pracy (Janz, 1997) współczynnik proporcjonalności  $M$  nazwano „water penetration resistance”. W dalszej części pracy współczynnik  $M$  będzie więc nazywany współczynnikiem oporu penetracji wody. Łatwo założyć, że im wyższa jest wartość parametru  $M$ , tym większy jest opór wnikania agresywnych cieczy, co powinno skutkować wyższą odpornością korozyjną materiału.

Celowe jest, aby wartości współczynnika  $M$  określać eksperymentalnie. Istotą pracy doświadczalnej jest wyznaczenie chwili zakończenia procesu podciągania kapilarnego, w której front wody osiągnie górną powierzchnię próbki  $x = h$ . Najprostszym sposobem rozwiązania takiego zagadnienia jest monitorowanie masy wody wchłoniętej przez materiał w procesie podciągania kapilarnego od momentu zetknięcia próbki z wodą. Na podstawie wyników takiego doświadczenia można określić czas podciągania kapilarnego  $\tau_c$ :

$$\tau_c = \left( \frac{w_c}{A} \right)^2 \quad (4)$$

gdzie  $w_c$  jest masą wody wchłoniętej przez próbkę suchego materiału o wysokości  $h$  i stałym przekroju poprzecznym w chwili zakończenia procesu podciągania kapilarnego, odniesioną do jednostki pola przekroju próbki w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu kapilarnego i  $A$  oznacza współczynnik sorpcji wody. Metody określania  $w_c$  oraz  $A$  przedstawiono między innymi w pracach (Janz, 1997; Nikitsin i in., 2005).

Po wyznaczeniu wartości  $\tau_c$  można obliczyć wartość współczynnika  $M$ , który charakteryzuje opór jaki materiał stawia penetrującej wodzie:

$$M = \frac{\tau_c}{h^2} \quad (5)$$

Alternatywnym sposobem oceny zdolności materiału do przeciwstawiania się wnikaniu cieczy agresywnych jest wyznaczenie promienia ekwiwalentnego kapilary  $r_e$ . Przez to pojęcie należy rozumieć taki promień kapilary, przy którym kapilara oraz rzeczywisty materiał kapilarno-porowaty będą scharakteryzowane jednakowym oporem penetracji cieczy ( $M_o = M$ ). W takim przypadku wzór (2) ma postać:

$$M = \frac{2\eta}{r_e \sigma \cos \theta} \quad (6)$$

Po przyjęciu wzoru (5) otrzymujemy równanie do wyznaczania średniego promienia ekwiwalentnego, uwzględniającego wszystkie własności materiału kapilarnego z punktu widzenia podciągania kapilarnego:

$$r_e = \frac{2\eta h^2}{\tau_c \sigma \cos \theta} \quad (7)$$

Za pomocą dobrze znanego parametru  $\xi$ , nazwanego krętnością kapilar, można pokazać, że średni promień ekwiwalentny jest znacznie mniejszy niż średni promień kapilary wyznaczony metodą porozymetryczną lub mikroskopową. Parametr ten wskazuje na to, ile razy droga  $l$  przebyta przez cząsteczkę wody w danym kierunku przekracza wysokość materiału w tym kierunku  $h$ :

$$\xi = \frac{l}{h} \quad (8)$$

Aby wyznaczyć krętność kapilar, można wykorzystać wzór przedstawiony w pracy (Afonin, 2000), który sformułowano na podstawie analogii pomiędzy procesami wymiany ciepła i pary wodnej (Lykov, 1961):

$$\xi = P \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[ \frac{\arcsin(2P-1)}{3} \right] \right\}^{-2} \quad (9)$$

gdzie  $P$  jest porowatością otwartą. Ponieważ przez część porów otwartych woda w procesie kapilarnego podciągania nie przepływa, tak więc do wzoru (9) zamiast porowatości otwartej  $P$  należy wpisać porowatość aktywną  $\Phi_a$ , która uwzględnia objętość porów zapełnianych w analizowanym procesie. Porowatość aktywną można wyznaczyć ze wzoru

$$\Phi_a = \frac{w_c}{\rho_w h} \quad (10)$$

w którym  $\rho_w$  jest gęstością wody. Po uwzględnieniu wzoru (4) równanie (10) przybiera postać:

$$\Phi_a = \frac{A \tau_c^{0,5}}{\rho_w h} \quad (11)$$

Teraz można określić wartość średniego promienia cylindrycznej kapilary  $r_k$  z uwzględnieniem jej krętności. W tym celu należy skorzystać ze wzoru (7), zastępując wysokość materiału  $h$  drogą cząsteczki wody  $l$ . Po uwzględnieniu wzorów (8) oraz (7) mamy:

$$r_k = \frac{2\eta h^2 \xi^2}{\tau_c \sigma \cos \theta} = \xi^2 r_e \quad (12)$$

Ze wzoru (12) wynika, że wzrost krętności kapilar powoduje znaczne zmniejszenie promienia ekwiwalentnego kapilary  $r_e$ , a więc powoduje również zwiększenie oporu penetracji wody w materiale.

### 3. Eksperyment i dyskusja jego wyników

Eksperyment miał umożliwić porównanie średnich wartości współczynnika oporu penetracji wody  $M$ , promienia ekwiwalentnego kapilary  $r_e$  oraz innych parametrów struktury porowatości wyrobów wapienno-piaskowych wyprodukowanych przy różnych kombinacjach czynników technologicznych. W badaniu, zgodnie z metodą zaproponowaną w pracach (Janz, 1997; Nikitsin i in., 2005), monitorowano zmianę masy wody wchłoniętej przez próbki materiału silikatowego w procesie jednokierunkowego podciągania kapilarnego. Badane próbki miały postać prostopadłościaków wyciętych z wyrobów silikatowych losowo wybranych w przedsiębiorstwach. Ze strony technologicznej próbki różniły się kontrolowanym poziomem trzech jakościowych czynników.

Jako czynnik A oznaczono trzy kolejne przedsiębiorstwa:  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A_3$ . Czynnik B, czyli typ wyrobu silikatowego ustalono na dwóch poziomach:  $B_1$  (cegła) i  $B_2$  (płytki elewacyjna). Czynnik C, czyli typ dodatku barwiącego ustalono na trzech poziomach:  $C_1$  (dodatek barwiący na niebiesko),  $C_2$  (dodatek barwiący na czerwono) i  $C_3$  (bez dodatku barwiącego).

Łącznie przygotowano sześć serii próbek różniących się kombinacją poziomu czynników technologicznych. Każda seria składała się z sześciu próbek, które miały praktycznie jednakowe wymiary, za wyjątkiem szóstej serii.

Rozpatrzone w eksperymencie kombinacje poziomów czynników zmiennych A, B i C (warunki wykonania prób) oraz uzyskane dla tych kombinacji wartości średnie pomiarów (średnia wysokość próbek  $h$ , czas podciągania kapilarnego  $\tau_c$ ) i wartości obliczonych parametrów (współczynnik oporu penetracji wody  $M$ , ekwiwalentny promień kapilary  $r_e$ , aktywna porowatość  $\Phi_a$ , krętność kapilar  $\xi$ ) pokazano w tabeli 1.

Z tabeli 1 widać, że współczynnik oporu penetracji wody  $M$  zmienia się w bardzo szerokim przedziale:  $4,151 \cdot 10^6 - 16,87 \cdot 10^6$  s/m<sup>2</sup>. Należy podkreślić, że według danych pracy (Nikitsin i Backiel-Brzozowska, 2008) próbki materiału ceramicznego wypalonego w temperaturze 850 i 1050°C charakteryzowały wartości współczynnika  $M$  zmieniające się w węższym przedziale:  $5,953 \cdot 10^6 - 9,432 \cdot 10^6$  s/m<sup>2</sup>. Sterując poziomem czynników technologicznych można więc zmieniać zdolność materiału silikatowego do przeciwstawiania się wnikaniu wody.

Analogiczne stwierdzenie można sformułować także w odniesieniu do wartości ekwiwalentnego promienia kapilary  $r_e$  obliczonego ze wzoru (7). W obliczeniach przyjęto wartości napięcia powierzchniowego wody  $\sigma$  i lepkości dynamicznej wody  $\eta$  odpowiadające temperaturze 20°C ( $\sigma = 0,727$  N/m;  $\eta = 0,001$  Pa·s), a kąt zwilżania przyjęto  $\theta = 60^\circ$ , na podstawie danych dla piasku kwarcowego i piaskowca zamieszczonych w pracy (Janz, 1997).

Po porównaniu wartości średnich porowatości aktywnej  $\Phi_a$  (patrz tabl. 1) z wartością średnią porowatości otwartej wyznaczonej na podstawie badania nasiąkliwości próbek wyjaśniono, że objętość porów napełnianych wodą w procesie kapilarnego podciągania wody stanowi nawet 80÷88% objętości porów otwartych. Średnia wartość krętności kapilar zmienia się w przedziale 2,331÷2,441, który zawiera się w zakresie  $1,5 < \xi < 2,5$  charakterystycznym dla większości materiałów budowlanych (Klem, 2005).

Na podstawie danych uzyskanych dla próbek pochodzących z pierwszego przedsiębiorstwa (czynnik A na poziomie  $A_1$ ) mamy możliwość oceny wpływu czynnika B (rodzaju wyrobu) na poziomie  $B_1$  i  $B_2$  oraz wpływu czynnika C (typu dodatku barwiącego) na poziomach  $C_1$  i  $C_2$  na współczynnik oporu penetracji wody  $M$ . W tym celu zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji, której wyniki przedstawiono w tabelicy 2.

W tabelicy 2 statystykę  $F_{emp}$  obliczono przez podzielenie średniego kwadratu dla czynników B i C oraz ich współdziałania przez średni kwadrat dla błędu. Średni kwadrat dla błędu  $s_e^2 = 0,713$  charakteryzuje zróżnicowanie cechy  $M$  w rozkładzie empirycznym pierwszego przedsiębiorstwa. Dzielać  $\sqrt{s_e^2}$  przez średnią arytmetyczną z wyników obserwacji  $\bar{M} = 5,969$  otrzymujemy jeszcze jeden często stosowany współczynnik zmienności będący miarą zróżnicowania względnego  $R = \sqrt{0,713} / 5,969 = 0,141$ . Weryfikację hipotezy o istotności czynników i ich współdziałaniu przeprowadzono za pomocą kryterium Fishera-Snedecora przy wybranym poziomie istotności  $\alpha$  (Jóźwiak i Podgórski, 2001). Wartość krytyczna tego kryterium, przy najczęściej przyjmowanym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  oraz przy stopniach swobody  $\nu_1 = 1$  dla licznika i  $\nu_2 = 20$  dla mianownika, wyniosła  $F_{0,05;1;20} = 4,351$ , natomiast przy  $\alpha = 0,01$   $F_{0,01;1;20} = 8,096$ . Ponieważ obliczona wartość statystyki  $F_{emp}$  pokazana w tab. 2 dla czynnika C i współdziałania BC przekracza wartość

Tab. 1. Warunki realizacji prób oraz ich wyniki

Nr próby	Czynniki A B C	$h$ [cm]	$\tau_c$ [s]	$M \cdot 10^{-6}$ [s/m <sup>2</sup> ]	$r_e$ [nm]	$\Phi_a$ -	$\xi$ -
1	$A_1 B_1 C_1$	8,14	50344	7,615	7,41	0,2058	2,414
2	$A_1 B_1 C_2$	8,14	27480	4,151	13,44	0,2218	2,400
3	$A_1 B_2 C_1$	8,11	42444	6,448	8,54	0,1935	2,433
4	$A_1 B_2 C_2$	8,06	36750	5,662	9,72	0,1940	2,431
5	$A_2 B_1 C_3$	8,12	61959	9,412	5,86	0,1886	2,441
6	$A_3 B_1 C_1$	25,00	1054729	16,871	3,25	0,2600	2,331

Tab. 2. Dwuczynnikowa analiza wariancji z sześcioma obserwacjami w czterech kombinacjach poziomu czynników B i C

Źródło zmienności	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Średni kwadrat	Statystyka $F_{emp}$
Czynnik B	0,177	1	0,177	0,248
Czynnik C	27,098	1	27,098	38,006
Współdziałanie BC	10,760	1	10,760	15,091
Błąd	14,259	20	0,713	
Razem	52,294	23		

krytyczną, mamy podstawę, aby stwierdzić, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,01$  (a tym bardziej na poziomie  $\alpha = 0,05$ ) zarówno efekt główny czynnika C, jak i efekt współdziałania czynników B i C są statystycznie istotne, czego nie można potwierdzić w odniesieniu czynnika B

Na drugim etapie analizy wariancji wykonano porównanie średnich wartości współczynnika M dla wszystkich poziomów czynników B i C za pomocą procedury Duncana (Ahnazarova i Kafarov, 1985). Liczba porównanych par średnich wyniosła  $\alpha = 4$ . Zgodnie z procedurą Duncana wyznaczono najmniejszą istotną różnicę:

$$NIR^D = t_{\alpha, \nu, k}^D s_{\bar{M}} \quad (13)$$

gdzie  $t_{\alpha, \nu, k}^D$  jest wartością krytyczną wielokrotnego testu Duncana, dla wybranego poziomu istotności  $\alpha$ , stopni swobody  $\nu$  dla błędu  $s_e^2$  i liczby  $k$  ( $2 \leq k \leq a$ ), określonej jako różnica kolejnych numerów dwóch porównywanych średnich w szeregu wszystkich średnich  $a$ , zapisanych w szereg rosnący plus jeden;  $s_{\bar{M}} = \sqrt{2s_e^2/n}$  to odchylenie standardowe dla różnicy średnich.

W rozpatrywanym przypadku  $s_{\bar{M}} = \sqrt{2 \cdot 0,713/6} = 0,488$ . Zapiszmy wartości  $\bar{M}$  (patrz tabl. 1 dla  $A_1$ ) w szeregu rosnącym:

Kombinacja	$B_1C_2$	$B_2C_2$	$B_2C_1$	$B_1C_1$
$\bar{M} \cdot 10^{-6}$	4,151	5,662	6,448	7,615
Nr/n/n	1	2	3	4

Z tablicy Duncana zaproponowanej w pracy (Ahnazarova i Kafarov, 1985) zapisano istotne wartości krytyczne  $t_{\alpha, \nu, k}^D$  dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  i stopni swobody  $\nu = 20$  oraz wyznaczono najmniejsze istotne różnice na podstawie wzoru (13):

k	2	3	4
$t_{0,05;20}^D$	2,95	3,10	3,18
$NIR^D$	1,440	1,513	1,552

Różnica porównywanej pary średnich (elementów kontrastujących) jest statystycznie istotna, jeżeli przekracza wartość  $NIR^D$ . Dla sześciu obliczonych różnic tylko jedna okazała się statystycznie nieistotna na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ :

$$\begin{aligned} \bar{M}(B_2C_1) - \bar{M}(B_2C_2) = \\ = 6,448 - 5,662 = 0,786 < NIR^D = 1,440 \end{aligned} \quad (14)$$

Oznacza to, że w przypadku płytek elewacyjnych zmiana typu dodatku barwiącego (czynnik C) z poziomu  $C_1$  na  $C_2$  nie powoduje znaczącej zmiany wartości współczynnika  $M$ . Taka sama zmiana poziomu czynnika C przy produkcji cegły powoduje statystycznie istotną zmianę współczynnika  $M$ .

Dla porównania efektów czynnika C na różnych poziomach czynnika B można również zastosować tak zwany kontrast  $\hat{\chi}$ , obliczony następująco:

$$\begin{aligned} \hat{\chi} = [\bar{M}(B_1C_1) - \bar{M}(B_1C_2)] - [\bar{M}(B_2C_1) - \bar{M}(B_2C_2)] = \\ = (7,615 - 4,151) - (6,448 - 5,662) = 2,678 \end{aligned} \quad (15)$$

Jeśli efekty czynnika C przy różnych poziomach czynnika B są jednakowe w sensie statystycznym, to wyznaczona różnica różnic nie powinna być zbyt wysoka. Aby to sprawdzić należy zweryfikować hipotezę zerową ( $H_0: \chi = 0$ ). W tym celu można zastosować kryterium Scheffe, obliczone przy wybranym poziomie istotności  $\alpha$ :

$$K_{\alpha} = \sqrt{\frac{a(a-1)s_e^2 F_{\alpha, a-1, \nu}}{n}} \quad (16)$$

gdzie  $a$  jest liczbą średnich w kontraście,  $\nu$  jest liczbą stopni swobody wariancji  $s_e^2$ . W analizowanym przypadku powyższe wartości wynoszą:  $a = 4$ ,  $n = 6$ ,  $s_e^2 = 0,713$ ,  $\nu = 20$ . Przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  mamy  $F_{0,05; 3; 20} = 3,1$ . Wówczas otrzymujemy:

$$K_{\alpha} = \sqrt{\frac{4(4-1)0,713 \cdot 3,1}{6}} = 2,103 \quad (17)$$

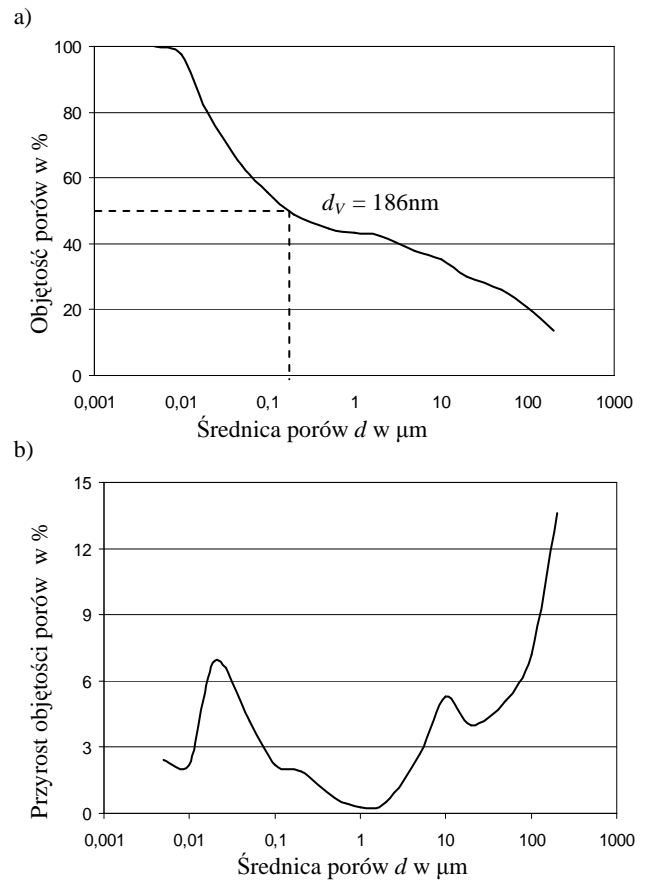
Ponieważ statystyka  $\hat{\chi} = 2,678$  przekracza wartość krytyczną  $K_{\alpha} = 2,103$ , to hipotezę  $H_0$  odrzucamy i podobnie jak wcześniej mamy podstawę aby stwierdzić (przy  $\alpha = 0,05$ ), że intensywność wpływu czynnika C na współczynnik  $M$  zależy od poziomu czynnika B. Taka zależność może być związana z właściwościami technologicznymi produkcji cegły i płytki w pierwszym przedsiębiorstwie.

Z tabeli 1 widać, że jeśli ciąg czterech wartości współczynnika  $M$  dla cegły wyprodukowanej w trzech przedsiębiorstwach ustawimy w szereg rosnący, wówczas w takiej samej kolejności ustawią się numery przedsiębiorstw. Wielokrotne porównanie wartości współczynnika  $M$  na poziomie  $\alpha = 0,05$  pokazało, że różnice wszystkich par średnich są statystycznie istotne, a więc uzyskany szereg rosnący średnich nie może być uznany za losowy. To świadczy o różnicach technologicznych przy produkcji cegły silikatowej w rozpatrywanych przedsiębiorstwach.

Wydawało się interesujące, aby ocenić parametry struktury porowatości materiału pochodzącego z trzeciego przedsiębiorstwa, który charakteryzuje się zarówno najwyższą średnią wartością współczynnika  $M$  oraz jednocześnie najwyższą porowatością aktywną  $\Phi_a = 0,260$  i porowatością otwartą  $P = 0,316$ . Ocenę zrealizowano za pomocą porozymetrii rtęciowej. Zastosowany porozymetr umożliwił wyznaczenie warunkowej średnicy porów w zakresie 0,004 – 300  $\mu\text{m}$ . Zgodnie z klasyfikacją (IUPAC, 1972) w tym przedziale mamy mezopory ( $4 < d < 100 \text{ nm}$ ) i makropory ( $d > 100 \text{ nm}$ ), natomiast mikropory ( $d < 4 \text{ nm}$ ) nie zostały uwzględnione w pomiarze. Na rysunku 1 pokazano całkowite i różniczkowe krzywe rozkładu objętości porów zgodnie z ich warunkową średnicą dla losowej próbki materiału. Z rysunku 1 wynika, że około 44% pomierzonej objętości składa się z mezoporów, a pozostałą część stanowią makropory. Woda jest najbardziej ruchliwa w makroporach, dlatego makropory odgrywają decydującą rolę w procesie przenoszenia wody do mezo- i mikroporów. Połowę objętości porów stanowią pory (kapilary cylindryczne) o średnicy nie przekraczającej  $d_v = 186 \text{ nm}$  (mediana z objętości pokazana na rys. 1). Analizując rozkład powierzchni właściwej porów  $S$  ustalono, że połowę jej wartości generują pory o średnicy nie większej niż 17nm (mediana z powierzchni). Przy znanej objętości  $V$  i powierzchni  $S$  porów wyznaczono średnią średnicę  $d_{VS} = 4V/S = 46 \text{ nm}$ . Okazało się, że średnica ta, a także średnica wyznaczona jako mediana z objętości  $d_v = 186 \text{ nm}$  i z powierzchni  $d_s = 17 \text{ nm}$  znacznie przekraczają wartość średnicy ekwiwalentnej  $d_e = 2r_e = 6,5 \text{ nm}$  (wartość  $r_e$ , patrz dolny wiersz tabeli 1). Jak już wcześniej zaznaczono parametry opisujące rozmiar porów określone za pomocą porozymetrii rtęciowej nie uwzględniają wszystkich własności struktury porowatości materiału, noszą charakter warunkowy i nie mogą w sposób pełny scharakteryzować zdolności materiału do przeciwstawiania się wnikaniu wody. Dane te nie powinny być więc stosowane do wyznaczania współczynnika  $M$ . W niektórych przypadkach zastosowanie danych porozymetrii rtęciowej do jakościowej oceny współczynnika oporu penetracji wody może przywieść do błędnych wniosków (Nikitsin i Backiel-Brzozowska, 2008).

Średnica porów  $d_k = 35 \text{ nm}$  obliczona zgodnie ze wzorem (12) z uwzględnieniem krętności kapilar także okazała się mniejsza niż średnica  $d_{VS} = 46 \text{ nm}$ . Taka różnica może świadczyć o tym, że krętność kapilar nie uwzględnia wszystkich własności struktury porowatości materiału silikatowego. Jak wskazują wyniki pracy (Rels i in., 2003) wartość współczynnika  $M$  może znacznie wzrosnąć przy przejściu z kapilar o stałym polu przekroju poprzecznego do kapilar o jednakowej długości i objętości, które mają periodyczne rozszerzenia i zwężenia. Można zauważyć, że wartość średniego promienia kapilar (obliczona na podstawie danych o kinetyce podciągania kapilarnego wody z uwzględnieniem krętności kapilar oraz innych właściwości struktury porowatości materiału) będzie

dążyć do wartości średnicy  $d_{VS}$  określonej za pomocą porozymetrii rtęciowej.



Rys. 1. Krzywe rozkładu objętości porów w zależności od warunkowej średnicy porów: a) krzywa całkowita, b) krzywa różniczkowa

Dla porównania, analogiczne badanie porozymetryczne wykonano dla materiału pobranego z cegły silikatowej pierwszego i drugiego przedsiębiorstwa. Ustalono, że udział mezoporów spadł do 38 – 40%, na korzyść znacznego przyrostu makroporów o średnicach w przedziale 0,2 – 1,4  $\mu\text{m}$ . W rezultacie wzrosły wartości średnic charakteryzujących punkty centralne rozkładów objętości i powierzchni właściwej porów. To w jakiejś mierze tłumaczy spadek wartości współczynnika  $M$  wyrobów tych dwóch przedsiębiorstw.

#### 4. Podsumowanie

W pracy zaproponowano zastosowanie współczynnika oporu penetracji wody  $M$  i promienia ekwiwalentnego  $r_e$  do scharakteryzowania zdolności autoklawizowanego materiału wapienno-piaskowego do przeciwstawiania się kapilarnemu podciąganiu wilgoci. Opisano metodę obliczania tych parametrów, bazującą na wynikach eksperymentu kinetyki jednokierunkowego podciągania wody. Przeprowadzono statystyczną analizę obliczonych wartości oporu penetracji wody  $M$  dla wyrobów z trzech przedsiębiorstw wykazując, że na etapie produkcji można w szerokim zakresie sterować wartością tego parametru. Pokazano, że przy opisywaniu własności struktury

porowatości materiału dane porozymetrii rtęciowej nie mogą być wykorzystywane do wyznaczenia wartości współczynnika  $M$  ze względu na ich warunkowy charakter. Podane zależności wykorzystano do wyznaczenia porowatości aktywnej i krętności kapilar w warunkach kapilarnego transportu wilgoci. Wyjaśniono, że krętność kapilar nie uwzględnia w pełnej mierze właściwości struktury porowatości materiału.

### Literatura

- Afonin A. V. (2000). Rasčet paropronicaemosti poristyh materialov metodom analogii. W: *Meždunarodna Konf. Naprjagajušie cementy, betony i samonaprážennye konstrukcii*. Brest 2000, 151-155.
- Ahnazarova S. L., Kafarov V. V. (1985). Metody optimizacii eksperimenta v himičeskoj tehnologii. *Yysšaja Skola*, Moskva.
- Janz M. (1997). Methods of measuring the moisture diffusivity At high moisture levels. Report TYBM-3076. Division of building materials, Lund Institute of Technology, University of Lund.
- Jóźwiak, Podgórski J. (2001). Statystyka od podstaw. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Klem P. (2005). Budownictwo ogólne. *Fizyka budowli*. Klem P. (red.). *Arkady*, Warszawa.
- Lykov A. V. (1961). Teoretičeskie osnovy stroitelnoj teplofiziki. *Izdatelstvo AN BSSR*, Minsk.
- IUPAC (1972). Manual of Symbols and Terminology. Appendix 11, Part. I, Pure and Applied -Chem. Vol. 31, No. 4, 577-621.
- Nikitsin V., Backiel-Brzozowska B. (2008). Ocena oporu penetracji wody w tworzywach ceramicznych. *Ceramika/Ceramics*, Vol. 103, 1031-1036.
- Nikitsin V., Backiel-Brzozowska B., Bołtryk M. (2005). Wpływ parametrów procesu wypalania na wskaźniki podciągania kapilarnego wody w tworzywach ceramicznych. *Ceramika/Ceramics*. Vol. 91. No. 2, 587-592.
- Pogorzelski J. A. (1987). Fizyka budowli. Podstawy wymiany ciepła i masy. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, Białystok.
- Roels S, Yandersteen K., Carmeliet J. (2003). Measuring and simulating moisture uptake in a fractured porous medium. *Advances in Water Resources*. Vol. 26, 237-246.
- Żygadło M., Piasta. Z. (1989). Prognozowanie mrozoodporności ceramicznych materiałów budowlanych na podstawie ich właściwości kapilarnych. *Inżynieria i Budownictwo*, 2/1989, 56-57.

### EVALUATION OF THE ABILITY OF CALCIUM-SILICATE GOODS TO RESIST WATER PENETRATION

**Abstract:** The evaluation of the water penetration resistance coefficient  $M$  and the porous equivalent radius  $r_e$  is proposed in this work to evaluate water penetration resistance in calcium-silicate material. The method of these parameters evaluation was described, based on the results of capillary pooling test. The specimens were prepared out of calcium-silicate goods from three manufacturing enterprises. The statistical analysis of the effect of three technological factors on the value of the water penetration coefficient  $M$  was also conducted. Moreover, it was shown that the mercury porosimetry data must not be used to evaluate water penetration coefficient  $M$ . Procedure of calculation of the mean conditional radius of capillary considering its tortuosity was also described.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiŚ/1/10