

## ZWIĄZEK MIĘDZY IZOTERMĄ SORPCJI A WSPÓLCZYNNIKIEM PRZEWODZENIA CIEPŁA CEGŁY SILIKATOWEJ

Halina GARBALIŃSKA\*, Agata SIWIŃSKA\*\*

\* Politechnika Szczecińska, Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych  
Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, e-mail: [Halina.Garbalinska@ps.pl](mailto:Halina.Garbalinska@ps.pl)

\*\* Politechnika Szczecińska, Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych  
Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, e-mail: [siwinska@ps.pl](mailto:siwinska@ps.pl)

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wyniki badań i analiz przeprowadzonych dla cegły silikatowej. W pierwszej kolejności przeprowadzono pomiary sorpcji wilgoci w temperaturze 20°C przy sześciu poziomach wilgotności względnej powietrza. Badania zostały zwięźzione opisem matematycznym uzyskanej izotermy sorpcji. W dalszej kolejności zrealizowano pomiary współczynników przewodzenia ciepła, przeprowadzone techniką stacjonarną na próbkach o różnym poziomie zawilgocenia. Otrzymano liniową zależność współczynnika  $\lambda$  od zawilgocenia materiałowego. Składowe wyniki poszczególnych etapów badań posłużyły do wyznaczenia dla testowanego materiału matematycznej zależności współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności względnej powietrza.

**Słowa kluczowe:** Sorpcja, izoterma sorpcji, równowaga wilgotnościowa, współczynnik przewodzenia ciepła.

### 1. WPROWADZENIE

W dużym stopniu na przydatność materiałów budowlanych do wykorzystania w przegrodach wpływa współczynnik przewodzenia ciepła. Projektanci sporządzający bilanse energetyczne budynków ograniczają się do dwóch normowych wartości tego parametru. Takie uproszczenie nie odzwierciedla w pełni rzeczywistych warunków, w jakich może znaleźć się przegroda w realiach budowlanych. Dotyczy to zwłaszcza warunków wilgotnościowych. Zawilgocenie materiału w największym stopniu wpływa na współczynnik przewodzenia ciepła – powodując jego wzrost przyczynia się do zwiększenia przenikania ciepła przez przegrody budowlane. Zwiększone straty ciepła na skutek przenikania przez przegrody wymagają ponoszenia większych nakładów na ogrzewanie, a co za tym idzie wzrasta zużycie paliw i emisja zamieszczeń do atmosfery. W związku z tym, że w porach materiałów budowlanych

zawsze występuje pewna ilość wilgoci, będzie się ona nieuchronnie przekładać na ich izolacyjność cieplną. Uwzględnienie wpływu wilgotności na przewodność cieplną jest stanowione normatywnie – poprzez ustalenie wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła. Wartość obliczeniową wyznacza się na bazie wartości deklarowanej, mnożąc ją przez współczynniki przeliczeniowe jednakowe dla szerokich interwałów wilgotności materiałów [8]. Tymczasem izotermy sorpcji typowych porowatych materiałów budowlanych nie reprezentują funkcji liniowych, a zatem nie upoważniają do takiego podejścia. Mając na uwadze powyższe uznano za celowe podjęcie próby odtworzenia funkcyjnej zależności współczynnika przewodzenia ciepła materiału porowatego od jego zawartości wilgoci, związanej izotermą sorpcji z warunkami cieplno-wilgotnościowymi otoczenia na przykładzie cegły silikatowej.

### 2. OPIS EKSPERYMENTU

Zaproponowanie zależności funkcyjnej wymagało trzy-etapowego rozwiązania problemu. W pierwszej kolejności przebadano i opisano związek między parametrem definiującym stan wilgotnościowy powietrza oraz materiałową zawartością wilgoci  $w(\varphi)$ . W dalszej kolejności wyznaczono doświadczalnie współczynnik przewodzenia ciepła przy różnych poziomach zawilgocenia materiału i zaproponowano opis matematyczny zmienności wilgotnościowej tego parametru  $\lambda(w)$ . W końcowym etapie powiązano obydwie zależności funkcyjne w jeden zapis matematyczny  $\lambda(\varphi)$ .

Zrealizowane pomiary dotyczyły cegły silikatowej i zostały przeprowadzone w dwóch niezależnych blokach eksperymentalnych.

Badania sorpcji wilgoci [9] przeprowadzono

w temperaturze 20°C przy sześciu poziomach wilgotności względnej powietrza ( $\varphi \approx 11, 33, 54, 75, 85, 98 \%$ ). Utrzymanie temperatury na założonym poziomie gwarantował termostat komorowy, natomiast stabilizację wilgotności względnej uzyskiwano z pomocą nasyconych roztworów wodnych odpowiednich soli: LiCl ( $\varphi \approx 11\%$ ), MgCl<sub>2</sub> ( $\varphi \approx 33\%$ ), Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ( $\varphi \approx 54\%$ ), NaCl ( $\varphi \approx 75 \%$ ), KCl ( $\varphi \approx 85\%$ ), K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ( $\varphi \approx 98\%$ ). Próbkę zaizolowaną na pobocznicę i wysuszoną do stałej masy umieszczono w szczelnym pojemniku z ustaloną wilgotnością względną powietrza, a te z kolei w komorze klimatycznej o stałej temperaturze (Rys. 1).



Rys. 1 Komora klimatyczna ze szczelnymi pojemnikami.  
Fig. 1. Climatic chamber with tightly closed boxes.

Pomiary polegały na okresowym ważeniu próbek o wymiarach 12×6,5×1 cm oraz średniej gęstości objętościowej 1,73 g/cm<sup>3</sup> i prowadzono je przez okres sześciu miesięcy [13]. Odstęp między badaniami na początku co 6, 8, 12 godzin wydłużono z czasem do 7 dni. Prowadzono je do momentu osiągnięcia stanu równowagi wilgotnościowej we wszystkich próbkach przechowywanych w danych warunkach cieplno-wilgotnościowych. Uzyskane dla stanu równowagowego wyniki posłużyły do wyznaczenia zawilgocenia sorpcyjnego, wyrażonego jako procentowa zawartość wilgoci odniesiona do masy suchej próbki. Łącznie przebadano 18 próbek. W każdym z 6 klimatów ustabilizowana wilgotność sorpcyjna wyznaczana była jako średnia arytmetyczna z trzech próbek. Wyniki badań zebrano w Tabeli 1.

Tabela 1. Średnia wilgotność sorpcyjna cegły silikatowej.  
Table 1. Average sorption humidity of silica brick.

$\varphi$ [%]	11	33	54	75	85	98
w [%]	1,68	2,16	2,47	3,32	4,30	10,48

Drugi wydzielony blok eksperymentalny dotyczył pomiarów współczynników przewodzenia ciepła cegły silikatowej, testowanej przy rozmaitych poziomach jej zawilgocenia: materiał suchy, materiał o pośrednich wartościach

zawilgocenia sorpcyjnego, które stymulowano przy  $\varphi \approx 11, 33, 54, 75, 85, 98 \%$  oraz materiał nasycony wodą. Do badań, których celem było odtworzenie wilgotnościowej zmienności współczynnika przewodności cieplnej wykorzystano metodę stacjonarną. Pomiary zrealizowano aparatem płytowym z osłoniętą płytą grzewczą GHP8302.3 [11]. Układ aparatu przedstawiono na Rys.2 a na Rys. 3 aparat z próbką do badań.

Płyta chłodząca		
<b>Próbka</b>		
Sekcja osłonowa	Sekcja pomiarowa płyty grzewczej	Sekcja osłonowa
Izolacja płyty osłonowej		
Płyta osłonowa		

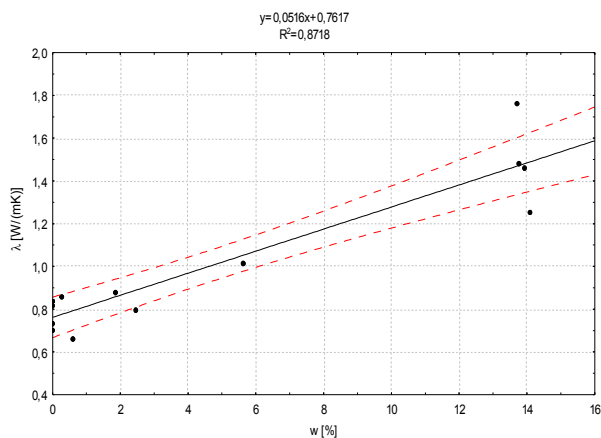
Rys. 2. Układ aparatu GHP8302.3.  
Fig. 2. System of apparatus GHP8302.3.



Rys. 3. Próbkę w aparacie GHP8302.3.  
Fig. 3. Sample in apparatus GHP8302.3.

W celu wyeliminowania niezamierzonych błędów pomiarowych wynikających z niedokładności obróbki powierzchni powierzchni czołowe próbek wyrównano na profesjonalnych szlifierkach. Powierzchnie te powinny dokładnie przylegać do grzejnika i chłodnicy aparatu. W przeciwnym razie na styku tych płaszczyzn tworzą się szczeliny powietrzne, które wpływają na wynik pomiarów. Zeszlifowano również powierzchnie styku obu cegieł, tak aby dobrze do siebie przylegały. Następnie wszystkie próbki zostały oznaczone i zinwentaryzowane. Kolejnym etapem pracy było wysuszenie próbek do stałej masy początkowo nad żelazem krzemionkowym, a następnie w suszarkach w temperaturze 40°C. Procedura sezonowania próbek do pomiarów była zgodna z normą [10]. Gęstość próbek do badań współczynników  $\lambda$  o wymiarach 24×25×6 cm wynosiła 1,80 g/cm<sup>3</sup>. W ten sposób przygotowane próbki przechowywano następnie w szczelnym pojemniku na rusztach nad nasyconymi roztworami odpowiednich soli. Podczas kondycjonowania próbek dokonywano okresowych odczytów zmiany masy. Do badań współczynników przewodzenia ciepła przystą-

piono po rocznym kondycjonowaniu próbek w przyjętych warunkach wilgotnościowych. Oprócz próbek o pośrednim poziomie wilgotności badaniom poddano też materiały wysuszone do stałej masy w temperaturze 40°C oraz 105°C a także nasycone wodą po obu cyklach suszenia. W związku z tym, że badaniom poddawano materiały o różnym stopniu zawilgocenia, próbki do badań zostały szczelnie zaizolowane folią aluminiową. Umieszczenie próbek w powłoce paroszczelnej miało zapobiec przemieszczaniu wilgoci do próbki i z próbki. Badanie każdej próbki odbywało się w zakresie temperatur od około 10°C do około 30°C. Różnica temperatur między płytą grzejną i chłodzącą wynosiła w przybliżeniu 20°C. Wyniki badań w postaci wykresu rozrzutu z liniowym dopasowaniem i przedziałem ufności 0,95 przedstawiono graficznie na Rys. 4.



Rys. 4. Wpływ zawilgocenia na  $\lambda$  cegły silikatowej.  
Fig. 4. Influence of humidity on  $\lambda$  of silica brick.

### 3. ZALEŻNOŚĆ $w(\varphi)$

Otrzymane wielkości ustabilizowanej wilgotności sorpcyjnej w temperaturze 20°C pozwoliły na wykreślenie izotermy sorpcji. Do matematycznego opisu otrzymanej izotermy wykorzystano kilkadziesiąt równań zaczerpniętych z obszernej literatury przedmiotu. Zdecydowano się na tak obszernie przetestowanie ich przydatności z uwagi na to, iż przeanalizowana literatura nie oferuje jednego modelu, który w zadawalający sposób odzwierciedlały dane eksperymentalne w odniesieniu do różnych materiałów w całym zakresie wilgotności względnej powietrza. Za pomocą metod statystycznych określono zgodność danych eksperymentalnych z proponowanymi w literaturze równaniami izoterm adsorpcji. W Tabeli 2 zestawiono najczęściej spotykane równania izoterm adsorpcji [1, 2, 4, 5, 6, 7, 12, 14, 15]. W pracy [14] szczegółowo wyjaśniono oznaczenia symboli z Tabeli 2.

Tabela 2. Równania izoterm.  
Table 2. Equations of isotherms.

Lp.	Nazwa	Równanie
1	Henry'ego	$a = K_{a,p} p$
2	Langmuira	$a = \frac{a_m k p}{1 + k p}$
3	Freundlicha	$a = k p^{\frac{1}{n}}$
4	Spisa	$a = a_m \frac{(k p)^{1/n}}{1 + (k p)^{1/n}}$
5	Dubinina i Raduszkiewicza	$a = a_0 e^{-b \left( \frac{R T \ln \frac{p_s}{p}}{p} \right)^2} = a_0 10^{-D \left( \log \frac{p_s}{p} \right)^2}$
6	Redlicha-Petersona	$a = \frac{A p}{1 + B p^n}$
7	Kisarowa	$a = \frac{A B \left( \frac{p}{p_s} \right)^n}{1 + B \left( \frac{p}{p_s} \right)^n}$
8	BET	$a = \frac{a_m C \frac{p}{p_s}}{\left( 1 - \frac{p}{p_s} \right) \left[ 1 + (C - 1) \frac{p}{p_s} \right]}$
9	Harkinsa-Jury	$\log \frac{p}{p_s} = B - \frac{A}{v^2}$
10	Hüttiga	$a = \frac{a_m C \frac{p}{p_s} \left( 1 + \frac{p}{p_s} \right)}{1 + C \frac{p}{p_s}}$
11	Łykowa	$u_L = u_{hig} \left( 1 - \frac{\ln \varphi}{d} \right)^{-1}$
12	Hansena	$u_L = u_{hig} \left( 1 - \frac{\ln \varphi}{A} \right)^{-\frac{1}{n}}$
13	Chena Y. i Chena Z.	$u_L = \frac{a \varphi}{(1 + b \varphi)(1 - c \varphi)}$
14	Kisieleva	$h = \frac{\Theta'}{K_I' (1 - \Theta') (1 + K_N \Theta')}$
15	Hilla i de Boera	$h = \frac{\Theta}{K_I (1 - \Theta)} \exp \left( \frac{\Theta}{1 - \Theta} - K_2 \Theta \right)$

16	Jovanoviča dla jednowarstwowej adsorpcji	$a = a_m \left[ 1 - \exp(-a'' h) \right]$
17	Jovanoviča dla wielowarstwowej adsorpcji	$a = a_m \left[ 1 - \exp(-a'' h) \right] \exp(b'' h)$
18	Dubinina	$a = \frac{a_0 k \frac{p}{p_s}}{1 - \frac{p}{p_s}}$
19	Dubinina-Serpinskiego	$\frac{p}{p_s} = \frac{a}{k(a_0 + a) \left( 1 - \frac{k-1}{k} \frac{a}{a_s} \right)}$
20	D'Arcy-Watta	$a = \frac{K_1 K_2 \frac{p}{p_s}}{1 - K_1 \frac{p}{p_s}} + C \frac{p}{p_s} + \frac{k_1 k_2 \frac{p}{p_s}}{1 - k_1 \frac{p}{p_s}}$
21	Dubinina-Astachowa	$a = \rho_c W_0 \exp \left[ - \left( \frac{RT \ln \frac{p}{p_s}}{E} \right)^n \right]$
22	Totha	$a = a_m \frac{kp}{\left[ 1 + (kp)^t \right]^{1/t}}$
23	Unilan	$a = \frac{a_m}{2s} \ln \left( \frac{1 + kpe^s}{1 + kpe^{-s}} \right)$
24	Kellera	$a = a_m \alpha_m \frac{kp}{\left[ 1 + (kp)^\alpha \right]^{1/\alpha}}$

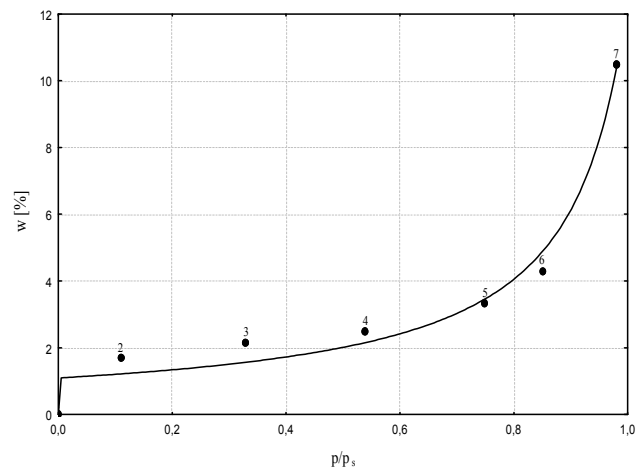
Wyniki estymacji współczynników równań zestawiono w Tabeli 3. W tabeli zamieszczono jedynie te równania, które najlepiej opisywały charakter izotermy. Do oceny jakości dopasowania równań do danych eksperymentalnych wykorzystano współczynnik korelacji *R*. Kryterium zgodności modelu matematycznego z danymi doświadczalnymi było kryterium metody najmniejszych kwadratów.

Na Rys. 5 przedstawiono graficznie najlepiej dopasowany model do eksperymentalnie wyznaczonych punktów izotermy, a mianowicie model Chena. Z wyników zamieszczonych w tabeli wynika, że najlepsze dopasowanie równań izoterm adsorpcji do danych doświadczalnych uzyskano w przypadku równań Chena Y. i Chena Z., D'Arcy-Watta, Jovanoviča dla wielowarstwowej adsorpcji oraz Dubinina-Serpinskiego. Świadczą o tym wysokie wartości współczynników korelacji *R*. Takie rozwiązania wskazują, że na ściankach

porów testowanego materiału budowlanego powstają wielomolekularne warstwy adsorpcyjne.

Tabela 3. Wyniki estymacji dla cegły silikatowej.  
Table 3. Results of estimation for silica brick.

Lp.	Równanie	Współczynniki	R
1	Chena Y. i Chena Z.	a=4653576 b=4258117 c=0,91286	0,99232
2	D'Arcy-Watta	K <sub>1</sub> =1,020403 K <sub>2</sub> =0,000013 C=4,934126 k <sub>1</sub> =1,020403 k <sub>2</sub> =0,000013	0,98686
3	Jovanoviča dla wielowarstwowej adsorpcji	a <sub>m</sub> =0,2030 a''=128,3575 b''=3,9401	0,94170
4	Dubinina-Serpinskiego	a <sub>0</sub> =5,88187 k=0,606355 a <sub>s</sub> =-1001213	0,91713



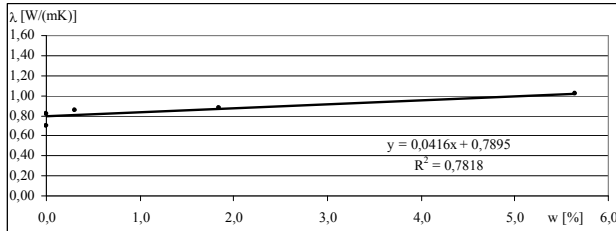
Rys. 5. Izoterma sorpcji cegły silikatowej 20°C.  
Fig. 5. Isotherm of sorption of silica brick 20°C.

#### 4. ZALEŻNOŚĆ λ(w)

Wyniki badań współczynników przewodzenia ciepła cegły silikatowej przeprowadzone przy różnych poziomach jej zawilgocenia (materiał wysuszony w temperaturze 40°C oraz 105°C, materiał o pośrednich poziomach wilgotności sorpcyjnej stymulowanych przy φ ≈ 11, 33, 54, 75, 85, 98 % przy temperaturze około 20°C, materiał nasycony wodą po wysuszeniu w temperaturze 40°C oraz 105°C) przy zastosowaniu techniki stacjonarnej, a mianowicie przy wykorzystaniu aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejącą GHP8302.3, przedstawiono na Rys. 4.

Wyniki badań potwierdziły negatywny wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną [3]. Jak należało oczekiwać

wartość współczynnika rośnie wraz ze wzrostem zawartości wilgoci i w proponowanym ujęciu zależność ta ma charakter liniowy. Dane odbiegające od tej tendencji mogą być spowodowane błędami wynikającymi z warunków prowadzenia pomiarów techniką stacjonarną. Po odrzuceniu błędnych (nielogicznych) wyników otrzymano zależność  $\lambda(w)$  przedstawioną na Rys. 6.



Rys. 6. Zależność między zawilgoceniem sorpcyjnym a przewodnością cieplną cegły silikatowej.  
Fig. 6. Relation between sorption humidity and thermal conductivity coefficient of silica brick.

## 5. ZWIĄZEK MIĘDZY $w(\varphi)$ I $\lambda(w)$

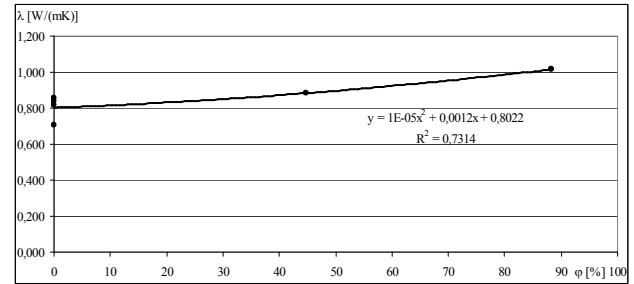
Ostatnim etapem analizy była próba funkcyjnego powiązania wcześniej pomierzonych wielkości. Jego zwięźczeniem jest podanie dla testowanego materiału zależności współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  od wilgotności względnej powietrza  $\varphi$  – w postaci jednolitej formuły matematycznej [14].

Dla cegły silikatowej równanie Chena izotermy sorpcji w temperaturze 20°C przyjmuje postać:

$$w = \frac{4653576\varphi}{(1 + 4258117\varphi)(1 - 0,91286\varphi)} \quad (1)$$

Równanie powyższe pomimo, iż daje zaniżone wartości w przypadku wilgotności względnych powietrza poniżej około 54 % (Rys. 5), to w zadawalający sposób odzwierciedla dane eksperymentalne i w związku z tym wykorzystano je do określenia  $\varphi$  dla próbek cegły silikatowej o pośrednim poziomie zawilgocenia sorpcyjnego poddawanych badaniom współczynnika przewodzenia ciepła. Do analizy przyjęto tylko te punkty, które przedstawiono na Rys. 6.

Podstawienie do równania (1) wielkości zawilgocenia próbek cegły silikatowej, uzyskanego w wyniku ich kondycjonowania nad nasyconym roztworami, pozwoliło na wyznaczenie z izotermy sorpcji wielkości wilgotności względnej powietrza  $\varphi$  i odwzorowanie zależności zobrazonej na Rys. 7.



Rys. 7. Zależność  $\lambda$  od  $\varphi$  dla cegły silikatowej.  
Fig. 7. Relation  $\lambda$  and  $\varphi$  for silica brick.

Otrzymana zależność dla cegły silikatowej ma charakter wielomianu stopnia drugiego. Przedstawiona powyżej analiza pozwoliła jedynie na uzyskanie odwzorowania  $\lambda(\varphi)$  tylko w wąskim przedziale  $\varphi$ . Natomiast poniżej przedstawiono równanie opisujące  $\lambda(\varphi)$  w całym zakresie, czyli od 0 % do 100 % wilgotności względnej powietrza. Zależność tę wyznaczono po dokonaniu przekształceń równania izotermy sorpcji Chena:

$$w = \frac{a\varphi}{(1 + b\varphi)(1 - c\varphi)} \quad (2)$$

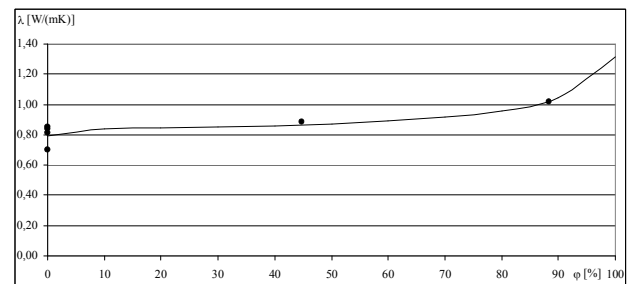
oraz równania liniowego opisującego zależność współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  od wilgotności materiałowej  $w$ :

$$\lambda = dw + e \quad (3)$$

i ostatecznie otrzymano równanie w postaci:

$$\lambda = \frac{ad\varphi}{(1 + b\varphi)(1 - c\varphi)} + e \quad (4)$$

Współczynniki równań (2, 3, 4) wynoszą odpowiednio:  $a=4653576$ ,  $b=4258117$ ,  $c=0,91286$ ,  $d=0,0416$ ,  $e=0,7895$ . Na wykresie Rys. 8 przedstawiono zależność  $\lambda(\varphi)$  analizowanego materiału w całym zakresie wilgotności względnej  $\varphi$ .



Rys. 8. Zależność  $\lambda(\varphi)$  cegły silikatowej w całym zakresie  $\varphi$ .  
Fig. 8. Relation  $\lambda(\varphi)$  of silica brick in all range of  $\varphi$ .

## 6. PODSUMOWANIE

Opracowane wyniki składowe z poszczególnych etapów badawczych cegły silikatowej pozwoliły na funkcyjne powiązanie opisu matematycznego uzyskanej izotermy sorpcji z odwzorowaną zmiennością przewodnictwa cieplnego uzyskaną techniką stacjonarną w zależności od zawilgocenia.

Prosta postać zaproponowanej zależności (4) pozwala na bezproblemowe uwzględnienie wpływu warunków wilgotnościowych na przewodność cieplną, co można wykorzystać bezpośrednio w komputerowych symulacjach procesów ciepno-wilgotnościowych zachodzących w przegrodach budowlanych. Zwiększy się w ten sposób dokładność obliczeń i poprawność przeprowadzanych bilansów cieplnych, w których konieczna jest znajomość parametrów termicznych wyrażonych w funkcji zawartości wilgoci. Będą one wówczas odpowiadały realnym sytuacjom, w jakich mogą znaleźć się przegrody zewnętrzne w budynku.

Wskazane jest również dalsze kondycjonowanie próbek nad nasyconymi roztworami w celu zwiększenia ich zawilgocenia sorpcyjnego, a następnie określenia współczynnika przewodzenia ciepła. Pozwoli to na uzyskanie większej liczby punktów pomiarowych niezbędnych do zweryfikowania otrzymanej zależności przy wyższych wilgotnościach, odpowiadających różnym poziomom stanów równowagowych.

### RELATION BETWEEN SORPTION ISOTHERM AND THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF SILICA BRICK

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wyniki badań i analiz przeprowadzonych dla cegły silikatowej. Badania dotyczyły sorpcji wilgoci cegły w temperaturze 20°C przy sześciu poziomach wilgotności względnej powietrza. Analizę zakończono opisem matematycznym uzyskanej izotermy sorpcji. Drugi blok badań dotyczył pomiarów współczynników przewodzenia ciepła przeprowadzonych techniką stacjonarną na próbkach o różnym poziomie zawilgocenia. Otrzymał liniową zależność współczynnika  $\lambda$  od zawilgocenia. Składowe wyniki poszczególnych etapów badań posłużyły do wyznaczenia matematycznej zależności współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności względnej powietrza.

### Literatura

[1] Chen Y., Chen Z.: *Transfer Function Method to Calculate Moisture Absorption and Desorption in Buildings*. Building and Environment, Vol. 33, No. 4, 201-207, 1998  
[2] Garbalińska H., Siwińska A.: *Izotermy sorpcji cegły ceramicznej, silikatowej i betonu komórkowego*. XI Polska Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka budowy w Teorii i Praktyce, Czasopismo Naukowe tom II, Sekcja Fizyki Budowy Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Łódź 2007, 41-46

[3] Garbalińska H., Siwińska A.: *Wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną materiałów budowlanych*. Naukowe seminarium polsko-niemieckie „Innowacyjne technologie w budownictwie proekologicznym”, Interreg IIIA, Szczecin 2006, 121-129

[4] Keller J., Staudt R.: *Gas adsorption equilibria. Experimental Methods and Adsorption Isotherms*. Springer, New York 2005

[5] Marynowicz A., Wyrwał J.: *Badanie właściwości wilgotnościowych wybranych materiałów budowlanych w warunkach izotermicznych*. Studia z zakresu inżynierii, z. 52, Warszawa 2005

[6] Ościk J. *Adsorpcja*. PWN, Warszawa 1983

[7] Paderewski M. L. *Procesy adsorpcyjne w inżynierii chemicznej*. WNT, Warszawa 1999

[8] PN-EN 12524:2003 Materiały i wyroby budowlane. Właściwości ciepno-wilgotnościowe. Tabela wartości obliczeniowe

[9] PN-EN ISO 12571:2002 Ciepno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie właściwości sorpcyjnych

[10] PN-EN 12664:2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego. Suche i wilgotne wyroby o średnim i małym oporze cieplnym

[11] PN-ISO 8302:1999 Izolacja cieplna. Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym. Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną

[12] Praca zbiorowa pod redakcją B. Ambrożka: *Kinetyka i dynamika procesowa*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej Nr 558, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2000

[13] Siwińska A. *Kinetyka procesu sorpcji wilgoci w porowatych materiałach budowlanych*. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. Budownictwo z. 109, 355-362, Gliwice 2006

[14] Siwińska A. *Związek między izotermą sorpcji a współczynnikiem przewodzenia ciepła porowatego materiału budowlanego*. Rozprawa doktorska, Szczecin 2008

[15] Siwińska A., Garbalińska H.: *Izotermy sorpcji materiałów na spoiwie cementowym. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2007, 349-354