

WŁAŚCIWOŚCI IZOLACYJNE ZAWILŻONEJ PRZEGRODY POROWATEJ

Stefan Jan KOWALSKI*, Andrzej RYBICKI*

* Politechnika Poznańska, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zakład Inżynierii Procesowej
Pl. Marii Skłodowskiej Curie 2,60-965 Poznań
e-mail: stefan.j.kowalski@put.poznan.pl; e-mail: andrzej.rybicki@put.poznan.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono studium właściwości izolacyjnych porowatej przegrody budowlanej w zależności od stopnia jej nasycenia wilgocią oraz intensywności przemian fazowych cieczy w parę wewnątrz przegrody. Analizę przeprowadzono na bazie modelu procesu suszenia, który pozwala opisać konwekcyjny pobór ciepła z otoczenia o wyższej temperaturze i przekazywanie go przez przegrodę do otoczenia o niższej temperaturze z uwzględnieniem zużycia części pobranego ciepła na przemianę fazową wewnątrz przegrody (ujemne źródło ciepła w postaci ciepła utajonego). Celem pracy jest pokazanie na drodze symulacji numerycznej, że przemiany fazowe występujące w nawilżonej przegrodzie znacząco obniżają jej temperaturę, co tym samym zwiększa pobór ciepła z otoczenia o wyższej temperaturze, na przykład z ogrzanego pomieszczenia mieszkalnego, obniżając tym samym jego temperaturę.

Słowa kluczowe: porowata przegroda, nasycenie wilgocią, przenikanie ciepła, przemiany fazowe.

1. WSTĘP

Podjęte w tej pracy zagadnienie dotyczy przegród budowlanych źle izolowanych przed absorpcją wilgoci z otoczenia. Praca ma charakter studium i jej celem jest analiza wpływu stanu zawilżenia przegrody i występujących w niej przemian fazowych na przepływ ciepła z otoczenia o wyższej do otoczenia o niższej temperaturze. Występujące w przegrodzie przemiany fazowe cieczy w parę stanowią ujemne źródła ciepła równoważone przez pobór ciepła z otoczenia o wyższej temperaturze (np. pomieszczenia mieszkalnego).

Efektom tego studium jest pokazanie, że mniejszy stopień nasycenia wilgocią przegrody nie musi oznaczać automatycznego polepszenia komfortu temperaturowego i zmniejszenia odpływu ciepła z pomieszczeń. Nawet przegroda bardziej nasycona wilgocią, w której brak jest przemian fazowych, może okazać się korzystniejsza z punktu widzenia izolacyjności. Oczywiście, dopiero prze-

groda porowata pozbawiona całkowicie wilgoci może zapewnić pełną skuteczność izolacyjności.

Numeryczna analiza problemu oparta jest na modelu suszenia opisującym całą złożoność transferu masy i ciepła oraz przemian fazowych, począwszy od stanu nasyconego przez nienasycony do stanu równowagowego z otoczeniem [4, 5]. Na jego podstawie określa się, między innymi, rozkłady wilgotności i temperatury w przegrodzie z uwzględnieniem i bez uwzględnienia przemian fazowych oraz dla różnych grubości przegrody i wartości początkowych stanu nawilżenia. W tej pracy określono stan termiczny przegrody dla zmieniającego się w czasie stanu wilgotnościowego, co pozwala wysnuć wnioski co do właściwości izolacyjnych przegrody.

2. MODELOWANIE ZJAWISKA

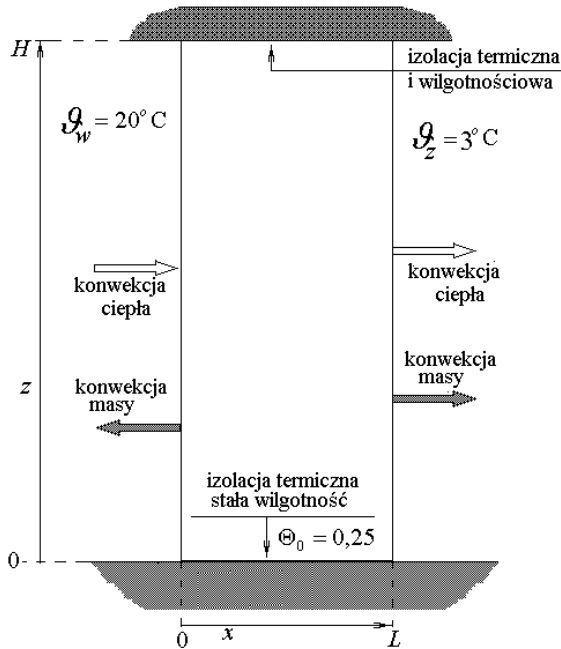
Podjęty temat jakościowej analizy termoizolacyjnych właściwości zawilżonej kapilarno-porowatej przegrody w otoczeniu suchego powietrza o różnych parametrach termodynamicznych po obu stronach przegrody wymaga uwzględnienia wzajemnie sprzężonych pól temperatury i koncentracji wilgoci. Równania opisujące te dwa pola bazują na teorii suszenia przedstawionej w monografii [4] z pewnymi uogólnieniami przedstawionymi w pracy [5], a dotyczącymi rozszerzenia teorii na pełny cykl procesu suszenia począwszy od stanu pełnego nasycenia do stanu równowagowego z otaczającym powietrzem.

W modelu tym przyjmuje się, że w okresie niemal całkowitego wypełnienia przestrzeni porów wodą, we wnętrzu materiału suszonego występują nieznaczne przemiany fazowe cieczy w parę. W tym okresie wilgość jest transportowana głównie siłami kapilarnymi i transportem termodyfuzyjnym z wnętrza materiału do jego powierzchni, gdzie następuje jej odparowanie do otaczającego powietrza. Gdy zawartość wilgoci w materiale spadnie poniżej wartości krytycznej θ_{kr} i usunięta zostanie wilgość kapilar-

na, co w praktyce objawia się pojawieniem suchych miejsc na powierzchni materiału, rozpoczyna się okres usuwania wilgoci związanej z materiałem fizykochemicznie ze zwiększającym się znaczeniem przemian fazowych wewnątrz materiału. Następuje zanikanie transportu wilgoci w postaci strumienia cieczy, a wzrasta znaczenie strumienia pary tworzonej w przemianach fazowych w całej objętości materiału suszonego.

Analiza właściwości izolacyjnych przegrody porowatej stanowiącej przedmiot rozważań niniejszej pracy dotyczy przede wszystkim tego drugiego okresu suszenia, gdy przemiany fazowe stanowią dominujący mechanizm usuwania wilgoci.

Rozważana jest prostokątna przegroda o wysokości H i szerokości L , której górna powierzchnia jest izolowana termicznie i hydraulicznie, a dolna tylko termicznie. Ściany boczne otoczone są powietrzem o stałych ale różnych po obu stronach temperaturach i wilgotności względnej (Rys. 1)



Rys. 1. Przegroda porowata.
Fig. 1. Porous wall.

Ilość masy i ciepła w przegrodzie określają równania bilansu masy i energii. Na bazie rozważań termodynamicznych określono zintegrowane strumienie ciepła i masy oraz związek fizyczny dla przemian fazowych [4]. Uwzględniając te zależności w równaniach bilansu masy i ciepła otrzymuje się następujący układ równań opisujących stan termiczno-wilgotnościowy w przegrodzie w stanie niepełnego nasycenia wilgotnością [4, 5]:

$$\rho^s \dot{\theta} = \nabla \cdot [A \nabla (c_T \vartheta + c_X \theta)] - \varpi (c_T \vartheta + c_X \theta) \quad (1)$$

$$\rho^s c_v \dot{\vartheta} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \vartheta) - l \varpi (c_T \vartheta + c_X \theta)$$

gdzie θ [kg H₂O/kg suchej masy] określa zawartość wilgoci, ϑ temperaturę, ρ^s gęstość ciała suchego, c_v ciepło właściwe, c_T i c_X współczynniki termodyfuzji i dyfuzji wilgoci, A i λ są współczynnikami transportu wilgoci i ciepła zależnymi od stanu zawilżenia, ϖ określa intensywność przemian fazowych, l jest utajonym ciepłem parowania, a ∇ oznacza operator Nabla dla zagadnienia dwuwymiarowego.

Współczynnik transportu wilgoci w przegrodzie zależy od temperatury, zawartości wilgoci i struktury porowatej

$$A(\vartheta, \theta) = \frac{\chi(\vartheta)}{\eta(\vartheta)} f(\theta) \quad (2)$$

gdzie $\chi(\vartheta) = 75 \cdot 10^{-3} (1 - 0.002 \cdot \vartheta)$ [Pa·m] oraz $\eta(\vartheta) = 183 \cdot 10^{-5} (1 + 0.053 \cdot \vartheta)^{-1}$ [Pa·s] oznaczają napięcie powierzchniowe i lepkość cieczy. Tutaj $f(\theta)$ jest współczynnikiem zależnym od struktury porów i zawartości wilgoci przyjętym w postaci

$$f(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{dla } \theta_{cr} \leq \theta \\ \left(\frac{\theta - \theta_A}{\theta_{cr} - \theta_A} \right)^2 & \text{dla } \theta_{cr} \geq \theta \geq \theta_A \end{cases} \quad (3)$$

gdzie f_0 jest parametrem zależnym od struktury, a θ_A oznacza zawartość wilgoci w przegrodzie w stanie równowagi termodynamicznej z otoczeniem.

Przyjęto na bazie przesłanek doświadczalnych, że intensywność przemiany fazowej zwiększa się wraz ubytkiem wilgoci, co wyraża przez następującą zależność współczynnika przemian fazowych od zawartości wilgoci

$$\frac{\varpi(\vartheta, \theta)}{\varpi_0(\vartheta)} = \begin{cases} 0 & \text{dla } \theta_{cr} \leq \theta \\ 1 - \left(\frac{\theta - \theta_A}{\theta_{cr} - \theta_A} \right)^2 & \text{dla } \theta_{cr} \geq \theta \geq \theta_A \end{cases} \quad (4)$$

gdzie $\varpi_0(\vartheta)$ jest parametrem zależnym od temperatury przegrody.

Wartość współczynnika przewodzenia ciepła nasyconego ośrodka kapilarno-porowatego jest zależna od stopnia wypełnienia porów wodą [2]. W tej pracy przyjęto, że współczynnik przewodzenia ciepła zmienia się wraz z zawartością wilgoci w sposób następujący [1, 3, 7]

$$\lambda = (1 - \phi) \lambda^{sT} + \phi S \lambda^{lT} \quad (5)$$

gdzie ϕ oznacza porowatość, S oznacza stopień wypełnienia porów cieczą, a λ^{st} i λ^{lt} są współczynnikami przewodzenia ciepła przegrody suchej i cieczy.

Warunki brzegowe opisują konwekcyjną wymianę ciepła i masy na ścianach bocznych, czyli

$$-A \frac{\partial}{\partial x} (c_T \vartheta + c_X \theta) \Big|_{x=0}^{x=L} = \alpha_m (\mu \Big|_{x=0}^{x=L} - \mu_a) \quad (6)$$

$$\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x=0}^{x=L} = \alpha_T (\vartheta \Big|_{x=0}^{x=L} - \vartheta_a) - l \alpha_m (\mu^v \Big|_{x=0}^{x=L} - \mu_a) \quad (7)$$

gdzie $\mu \Big|_{x=0}^{x=L}$ oraz μ_a oznaczają potencjały chemiczne pary wodnej w powietrzu odpowiednio przy powierzchni przegrody i z dala od niej, a α_T i α_m są współczynnikami konwekcyjnej wymiany ciepła i masy.

Uzupełniające warunki brzegowe stanowią warunek izolacji termicznej na górnej i dolnej powierzchni oraz warunek izolacji hydraulicznej na górnej powierzchni i stała wartość wilgotności na dolnej powierzchni, czyli:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{z=0}^{z=H} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{z=0}^{z=H} = 0, \quad \theta_{z=0} = \theta_0 \quad (8)$$

Jako warunki początkowe przyjęto równomierne rozkłady wilgotności i temperatury w przegrodzie, równe odpowiednio wilgotności zasilania przegrody u dołu przegrody i temperaturze otoczenia chłodniejszego, czyli

$$\theta(x, z, t) \Big|_{t=0} = \theta_0, \quad \vartheta(x, z, t) \Big|_{t=0} = \vartheta_z \quad (9)$$

Przywołując definicję potencjału chemicznego dla pary wodnej w powietrzu [8], otrzymuje się następujący wzór na siłę napędową dla konwekcyjnej w wymiany pary wodnej między przegrodą o otoczeniem

$$\mu \Big|_{x=0}^{x=L} - \mu_a = 0.462 \vartheta_A \ln \frac{x_A}{x_a} - (7.36 - 0.462 \ln x_A) (\vartheta_A - \vartheta_a) \quad (10)$$

gdzie ϑ_A i $\vartheta_a = \{ \vartheta_z, \vartheta_w \}$ są temperaturami, a x_A i x_a ułamekami molowymi pary wodnej w powietrzu odpowiednio przy powierzchni próbki i z dala od próbki.

3. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Obliczenia przeprowadzono dla przegrody o wysokości $H = 2$ m oraz dwóch różnych szerokości $L = 0,30$ m i $0,15$ m przyjmując następujące wartości współczynników:

$\vartheta_w = 20$ °C (z lewej strony), $\vartheta_z = 3$ °C (z prawej strony), $x_a = 0.075$, $x_A = 0.107$, $f_0 = 6 \cdot 10^{-10}$ kg·s²/m²,

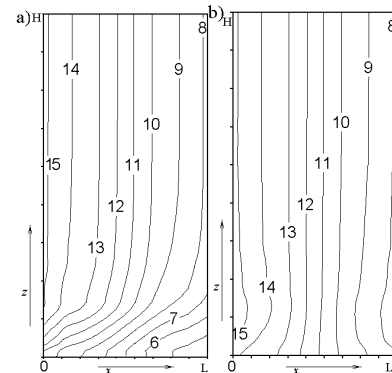
$\omega_0 = 2,5 \cdot 10^{-9}$ s/m², $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-3}$ m²/s, $\rho^s = 1600$ kg/m³, $c_v = 1,56 \cdot 10^2$ J/kg·K, $c_T = 3,6 \cdot 10^{-4}$ m²/s²·K, $c_X = 10^{-3}$ m²/s², $\theta_0 = 25\%$, $\theta_{cr} = 15\%$, $\theta_A = 6\%$.

Na dolnej podstawie przegrody przyjęto stałą wartość zawilżenia θ_0 większą od wilgotności krytycznej θ_{cr} i taką samą zarówno w fazie pełnego jak i niepełnego nienasyconienia przegrody wilgotnością. W otoczeniu ścianach bocznych przegrody przyjęto stałe temperatury dla całego procesu odpowiednio: temperatura otoczenia cieplejszego (wnętrza pomieszczenia) $\vartheta_w = 20$ °C i temperatura otoczenia chłodniejszego (zewnątrza) $\vartheta_z = 3$ °C.

Mimo, że w tej pracy rozpatrywany jest przede wszystkim tzw. drugi okres suszenia odnoszący się do zawartości wilgotności mniejszych od wilgotności krytycznej, to obliczenia prowadzone są od stanu początkowego poprzez stan nasycony do nienasyconego. Wyniki obliczeń dotyczące stanu nasyconego są prezentowane w pracy [6]. Dlatego w tej pracy analizowane są wyniki dotyczące przede wszystkim okresu nienasyconego, trudniejszego do matematycznego modelowania ze względu na uwzględnienie przemian fazowych. W prezentacji wyników chcemy zwrócić szczególną uwagę na nowe element, jaki wnosi uwzględnienie w modelu matematycznym przemian fazowych. W analizie porównuje się więc wyniki obliczeń dla modelu uwzględniającego i nie uwzględniającego przemiany fazowe wewnątrz przegrody, czyli ze źródłami i bez źródeł ciepła.

Do rozwiązania powyższego układu równań zastosowano metodę elementów skończonych dla pochodnych przestrzennych oraz trzypunktową metodę różnic skończonych dla pochodnych po czasie.

Rys. 2a przedstawia izotermy ilustrujące rozkład temperatury w przegrodzie wzdłuż wysokości przegrody z uwzględnieniem przemian fazowych, a rys. 2b bez uwzględniania przemian.

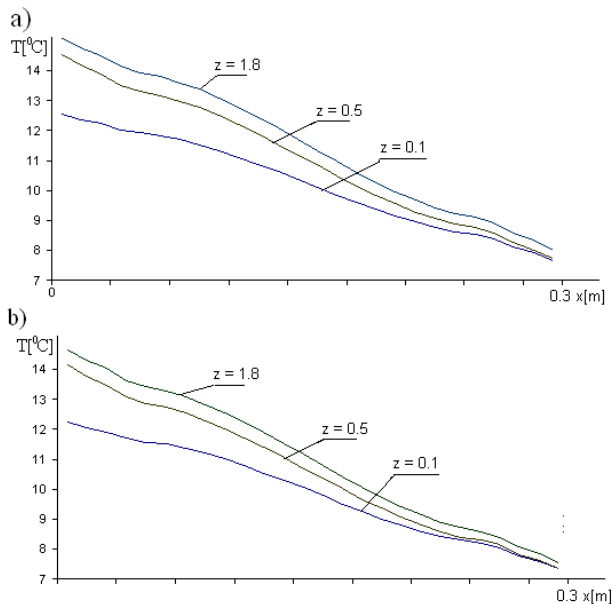


Rys. 2. Rozkład temperatury wzdłuż przegrody ($L = 0,3$ m): a) z przemianami fazowymi, b) bez przemian fazowych.

Fig. 2. Temperature distribution alongside the wall ($L = 0,3$ m): a) with phase transitions, b) without phase transitions.

Oba rysunki odnoszą się do momentu ustalenia się procesu wymiany ciepła. Porównując oba rysunki można zauważyć pewne różnice w przebiegu izoterm w przegrodzie, a mianowicie mniejsze wartości temperatury w przegrodzie, w której uwzględniono przemiany fazowe, mimo że warunki początkowo-brzegowe były te same. Świadczy to o pochłanianiu pewnej ilości ciepła pobranego z otoczenia na utajone ciepło parowania. W konsekwencji zimniejsza przegroda będzie pobierać więcej ciepła z otoczenia o wyższej temperaturze.

Na rys. 3a pokazano rozkład temperatury w poprzek przegrody na różnych jej wysokościach z uwzględnieniem przemian fazowych, a rys. 3b bez uwzględnienia tych przemian. Obie wizualizacje odnoszą się do momentu, gdy proces wymiany ciepła stał się ustalony.



Rys. 3. Rozkład temperatury w poprzek przegrody ($L = 0,3$ m) na różnych jej wysokościach: a) z przemianami fazowymi, b) bez przemian.

Fig. 3. Temperature distribution across the wall ($L = 0,3$ m) at different heights: a) with phase transitions, b) without phase transitions.

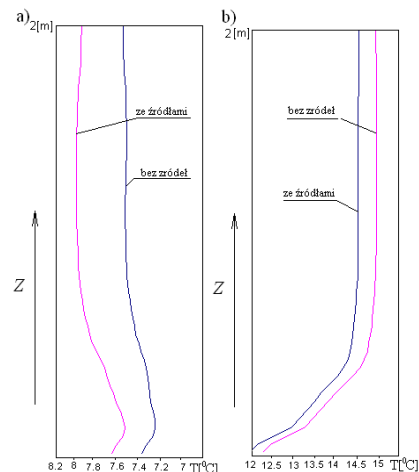
Widoczne są pewne różnice zarówno w rozkładzie temperatur w poprzek przegrody, jak i w wartościach temperatury. Zauważyć można niższą temperaturę od strony otoczenia cieplejszego na powierzchni przegrody, w której uwzględnione są przemiany fazowe. Odwrotnie jest na powierzchni przegrody od strony otoczenia chłodniejszego. Oznacza to, po pierwsze, większy pobór ciepła z otoczenia cieplejszego przez przegrodę z przemianami fazowymi (niższa temperatura powierzchni wewnętrznej), po drugie, szybsze oddawanie przez taką przegrodę ciepła do otoczenia chłodniejszego (wyższa temperatura po-

wierzchni zewnętrznej). Zgodnie bowiem z prawem Newtona dla konwekcyjnej wymiany ciepła, szybkość wymiany zależy od różnicy temperatur, t.j.

$$q = h \left(T \Big|_{z=0} - T_a \right) \quad (11)$$

gdzie h oznacza współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła.

Rysunki 4a i 4b, które przedstawiają rozkłady temperatury wzdłuż powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody z przemianami fazowymi i bez tych przemian, jeszcze wyraźniej ilustrują możliwość większego poboru ciepła z otoczenia cieplejszego i oddawania ciepła do otoczenia chłodniejszego – przez przegrodę z przemianami fazowymi. Na powierzchni zewnętrznej bowiem temperatura powierzchni przegrody, w której uwzględniono przemiany fazowe, jest nieco wyższa od temperatury powierzchni przegrody, dla której w obliczeniach nie uwzględniono przemian fazowych. Odwrotnie kształtują się rozkłady temperatur na powierzchni wewnętrznej przegrody. Temperatura tej powierzchni jest nieco niższa, gdy uwzględnia się przemiany fazowe, co oznacza że ta ściana będzie pobierać więcej ciepła od otoczenia, niż ściana przegrody w której brak jest przemian fazowych.

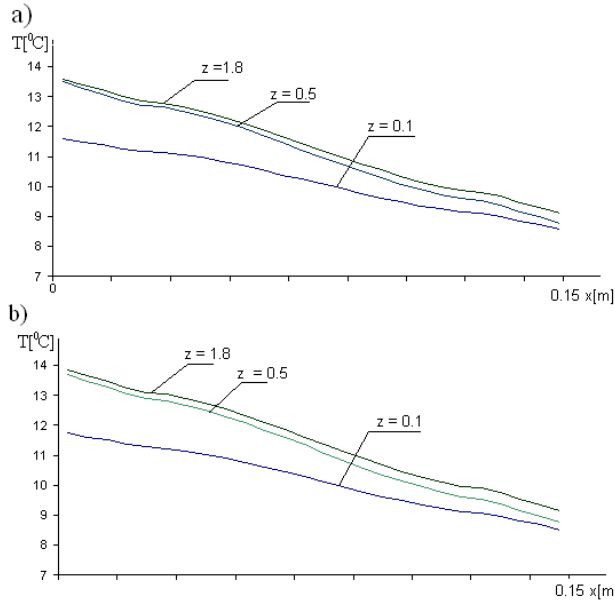


Rys. 4. Rozkład temperatury wzdłuż powierzchni przegrody ($L = 0,3$ m) z przemianami fazowymi i bez tych przemian: a) powierzchnia zewnętrzna b) powierzchnia wewnętrzna.

Fig. 4. Temperature distribution along the wall surface ($L = 0,3$ m) with phase transitions and without phase transitions: a) external surface, b) internal surface.

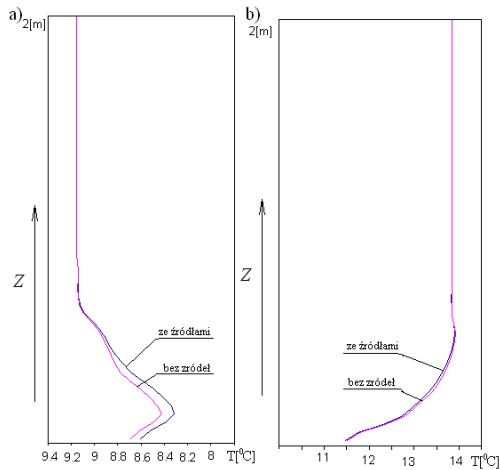
Rysunki 2 do 4 dotyczą przegrody o szerokości $L = 0,3$ m. aby przeanalizować efekt wpływu przemian fazowych na izolacyjność przegród w zależności od jej grubości, poniżej przedstawiono wyniki rozkładu temperatury w przegrodzie o połowę cieńszej, t.j. $L = 0,15$ m.

Na rys. 5a pokazano rozkład temperatury w poprzek przegrody o grubości $L = 0.15$ m na różnych jej wysokościach z uwzględnieniem przemian fazowych, a rys. 5b bez uwzględnienia tych przemian.



Rys. 5. Rozkład temperatury w poprzek przegrody ($L = 0,15$ m) na różnych jej wysokościach: a) z przemianami fazowymi, b) bez przemian.

Fig. 5. Temperature distribution across the wall ($L = 0,15$ m) at different heights: a) with phase transitions, b) without phase transitions.



Rys. 6. Rozkład temperatury wzdłuż powierzchni przegrody ($L = 0,15$ m) z przemianami fazowymi i bez tych przemian: a) powierzchnia zewnętrzna b) powierzchnia wewnętrzna.

Fig. 6. Temperature distribution along the wall surface ($L = 0,15$ m) with phase transitions and without phase transitions: a) external surface, b) internal surface.

Ja wynika z rys. 5a i 5b w cieńszej przegrodzie widoczna jest mniejsza rozbieżność temperatur określonych na

podstawie modelu uwzględniającego i nie uwzględniającego przemiany fazowe. Tę niewielką różnicę lepiej uwiidaczniają rys. 6a i 6b, które przedstawiają rozkłady temperatury wzdłuż powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody z przemianami fazowymi i bez tych przemian.

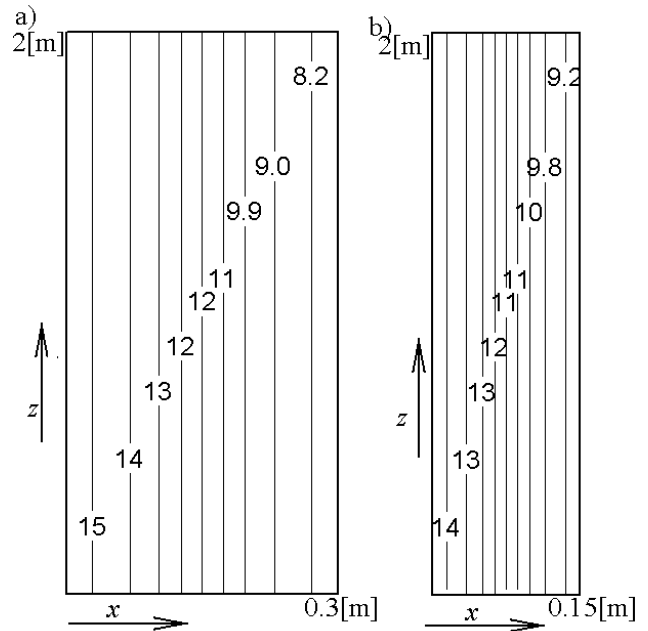
Pewna rozbieżność w wartościach temperatur widoczna jest jedynie w dolnej części przegrody, czyli w pobliżu zasilania przegrody w wilgoć. Można więc stwierdzić, że przemiany fazowe mają większe znaczenie i wpływają istotniej na obniżenie temperatury w przegrodach grubszych ze względu na zwiększone zasilanie wilgocią źle izolowanej przegrody.

Dla porównania przedstawione są poniżej obliczenia dla przegrody dobrze izolowanej, czyli z następującymi warunkami brzegowymi na dolnej i górnej podstawie przegrody:

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{z=0}^{z=H} = 0, \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{z=0}^{z=H} = 0 \quad (12)$$

Pozostałe warunki brzegowe i warunki początkowe pozostają takie same jak w powyższych obliczeniach, czyli obowiązują równania (6), (7) i (9).

Rysunki 7a i 7b, które przedstawiają rozkłady temperatury wzdłuż powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej dla przegrody z przemianami fazowymi i bez tych przemian.



Rys. 7. Rozkład temperatury wzdłuż powierzchni przegrody dobrze izolowanej: a) grubość przegrody 0,3 m, b) grubość przegrody 0,15 m.

Fig. 7. Temperature distribution along the wall surface well insulated : a) wall thickness 0,3 m, b) wall thickness 0,15 m.

Jak wynika z rys. 7 w przegrodzie dobrze izolowanej temperatura ściany, po ustaleniu się procesu wymiany ciepła i masy, jest stała wzdłuż całej jej wysokości. Po osiągnięciu przez przegrodę wilgotności równowagowej $\theta = \theta_A$, przemiany fazowe ustają. Nie ma już wymiany wilgoci, gdyż przegroda nawilżona na początku została wysuszona. Od tego momentu jest tylko wymiana ciepła między ciepłym i chłodnym otoczeniem.

4. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

W prezentowanej pracy podjęto temat jakościowej analizy właściwości termoizolacyjnych zawilżonej przegrody kapilarno-porowatej w otoczeniu suchego powietrza o różnych parametrach termodynamicznych po obu stronach. Wykorzystując znajomość zjawisk towarzyszących procesom suszenia materiałów kapilarno-porowatych zwrócono uwagę na zjawisko przemian fazowych podczas szacowania jakości przegrody z punktu widzenia jej walorów izolacyjnych w przypadku, gdy przegroda ta nie jest całkowicie sucha. Zwykle w stanie niepełnego nasycenia wilgocią, czyli stanu pozornie suchego, nie ma transportu wilgoci w postaci ciekłej a usuwanie wilgoci następuje przez jej odparowanie wewnątrz przegrody i przez transport pary na zewnątrz. Przemianom fazowym towarzyszy pochłanianie dużej ilości ciepła, tzw. ciepła utajonego, co może skutkować znacznym obniżeniem temperatury przegrody niż na pozór by się wydawało, a co zatem idzie zwiększonemu poborowi ciepła z otoczenia cieplejszego i obniżeniem jego temperatury.

W przeprowadzonym w tej pracy studium przedstawiono ten problem wykreślając izotermy i rozkłady temperatur na podstawie matematycznego modelu suszenia, w którym uwzględnione są przemiany fazowe. Porównując wykresy izoterm i rozkładu temperatur wzdłuż powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej pokazano niekorzystny z punktu widzenia izolacyjności rozkład temperatur w przypadku występowania w przegrodzie przemian fazowych. Pokazano też, że ten niekorzystny efekt powiększa się wraz ze wzrostem grubości przegrody.

Wniosek końcowy odnosi się nie tylko do otrzymanych wyników szczegółowych przedstawionych na rysunkach, ale także ma charakter ogólny, a dotyczy on precyzji modelowania matematycznego zjawisk. Autorzy tej pracy przedstawiając problem rozkładu wilgotności, temperatury i naprężeń w porowatej przegrodzie w swojej wcześniejszej pracy [6] nie mogli przedstawić zjawiska dysktowanego w tej pracy, gdyż w stosowanym tam modelu pominięte były przemiany fazowe. Z punktu widzenia analizy naprężeń, założenie pomijające przemiany fazowe było oczywiście uzasadnione.

INSULATION PROPERTIES OF SATURATED POROUS WALL

Summary: The thermal insulation properties of porous wall were analyzed in dependence on the saturation degree and the phase transition intensity of water into vapor inside the wall. The analysis was based on the complete model of drying that enabled description of heat supply from the surroundings of higher temperature and transfer it to the surroundings of lower temperature with taking into account of the heat consumed for the phase transition inside the wall (negative heat source in the form of latent heat of evaporation). It was shown on the way of numerical simulations that the phase transitions significantly decreased the temperature of the wall, and this caused an increased consumption of the heat from the surroundings of higher temperature, e.g. from a warm room, what decreased its temperature.

Literatura

- [1] BANASZAK J., Oszacowanie efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła dla materiałów suszonych, Materiały 11-tego Polskiego Sympozjum Suszarnictwa (XI PSS), Poznań, 13-16 wrzesień 2005.
- [2] Jougnot D., Revil R., Interactive comment on "Thermal conductivity of unsaturated clay-rocks, Hydrol. Earth Syst. Sci. Disc. 5, S2634-S2638, 2009.
- [3] KETELAARS A.A.J., Drying Deformable Media. Kinetics, Shrinkage and Stresses, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1992.
- [4] Kowalski S.J. *Thermomechanics of drying processes*. Springer, Berlin 2003.
- [5] Kowalski S.J., Rybicki A. *The vapour-liquid interface and stresses in dried bodies* in "Drying of Porous Materials", Springer, Dordrecht 2007.
- [6] Kowalski S.J., Rybicki A. Pola temperatury, koncentracji wilgoci i naprężeń w zawilżonej przegrodzie wywołane zmiennymi parametrami powietrza po obu stronach, Materiały Konferencyjne IX Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, Łódź 2003.
- [7] MUSIELAK G., BANASZAK J., Non-linear Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Kaolin Cylinder under Non-steady conditions, *Transport in Porous Media* 2007, **66**, 1-2, 121-134.
- [8] Szarawara J. *Termodynamika chemiczna*, WNT, Warszawa, 1985

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej DS-32-266/09 na Politechnice Poznańskiej