

DYNAMICZNA METODA POMIARU ZAWARTOŚCI MATERIAŁU FAZOWO-ZMIENNEGO W IZOLACJI WŁÓKNISTEJ

Elżbieta KOSSECKA*, Jan KOŚNY**

* Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa, e-mail: ekossec@ippt.gov.pl
Oak Ridge National Laboratory; Buildings and Materials Group
Bldg. 3247, M.S. 6070, Oak Ridge, TN 37831-6070, U.S.A.; e-mail: kjo@ornl.gov

Streszczenie: Przedstawiono koncepcję metodyki prowadzenia testowych pomiarów zawartości materiału fazowo-zmiennego, w dużych i w założeniu jednorodnych próbkach izolacji z włókna szklanego lub celulozy, z użyciem aparatu płytowego. Podano sposób szacowania stałej czasowej próbki w procesie ustalania się strumienia ciepła po skoku temperatury.

Słowa kluczowe: materiał fazowo-zmienny, izolacja celulozowa z PCM, aparat płytowy, pomiary testowe, stała czasowa

1. WPROWADZENIE

Jednym ze sposobów poprawy własności użytkowych i ograniczenia energochłonności lekkich budynków jest zwiększenie ich zdolności do magazynowania ciepła poprzez zastosowanie materiałów fazowo-zmiennych (Phase Change Materials; PCM). Elementy budowlane z dodatkiem materiałów fazowo-zmiennych przyczyniają się do obniżenia szczytowego zapotrzebowania mocy elektrycznej na klimatyzację i pozwalają na bardziej równomierną pracę instalacji klimatyzacyjnej; zmniejszają też zapotrzebowanie na ogrzewanie nocą.

Nowoczesne materiały, które mogą stanowić dodatek uszlachetniający do tradycyjnych materiałów budowlanych, są produkowane przy zastosowaniu techniki mikrokapsułkowania, polegającej na zamykaniu mikroskopijnych kropelek wosku w powłoce z twardego polimeru akrylowego. Wielkość mikrokapsulek wynosi od 2 do 20 mikrometrów. Są one nieprzepuszczalne – zatem można je bezpiecznie przetwarzać. Oferowane są produkty w postaci dyspersji mikrokapsulek w wodzie i w postaci suchego proszku. Temperatury topnienia i krzepnięcia znajdują się w przedziale 21° - 26°C.

Obszar zastosowań tak przygotowanego materiału fazowo-zmiennego w budownictwie jest szeroki. Obejmuje w szczególności tynki gipsowe, płyty gipsowo-kartonowe,

bloczki, farby, pianki oraz wylewki. W pracach Heima, Klemma i Clarke'a [1, 2] przedstawione są wyniki symulacji procesów transportu ciepła w budynku, w którym jako wykładziny ścian zastosowano płyty gipsowe z PCM, w warunkach klimatu Polski.

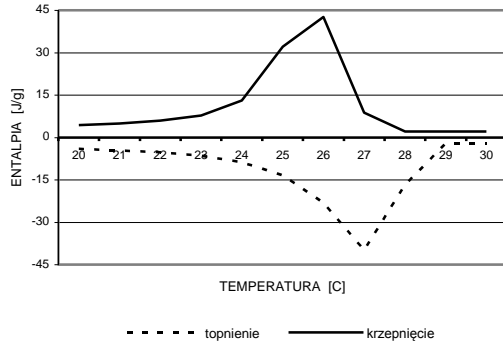


Rys. 1 Obraz mikroskopowy izolacji z materiałem fazowo-zmiennym w postaci mikrokapsulek

Fig. 1 PCM-enhanced fibrous cellulose insulation

W Oak Ridge National Laboratory prowadzone są od kilku lat badania izolacji włóknistych z dodatkiem PCM w postaci mikrokapsulek. Uruchomiona została linia do produkcji w małej skali izolacji na bazie włókna celulozowego; obraz mikroskopowy takiej izolacji pokazuje rysunek 1. Proces produkcyjny jest dość skomplikowany, możliwe są straty; poza tym otrzymany materiał jest w skali makroskopowej silnie niejednorodny. Tak więc faktyczna zawartość PCM w izolacji może się znacznie różnić od planowanej. Nie zawsze wiadomo, czy w danej partii materiału jest go np. 15% czy 20% czy też 25%.

Potrzebna jest zatem prosta w użyciu metoda sprawdzania zawartości PCM w otrzymywanym produkcie. W pracach [3] i [4], dostępnych w Internecie i łatwych do znalezienia po wpisaniu odpowiednich haseł w wyszukiwarce, przedstawiono szczegółowo program badań izolacji z włókna celulozowego z dodatkiem PCM w postaci proszku i wyniki szeregu testów prowadzonych w warunkach laboratoryjnych i polowych. Dane kalorymetryczne materiału fazowo-zmiennego - jako różnice entalpii w procesie topnienia i krzepnięcia - obrazuje rysunek 2.



Rys. 2 Dane kalorymetryczne materiału fazowo-zmiennego
Fig. 2 Calorimetric data for PCM

2. TESTOWANIE PRÓBEK IZOLACJI Z PCM Z UŻYCIEM APARATU PŁYTOWEGO

Pomiary zawartości materiału fazowo-zmiennego, o znanym cieple przemiany, w próbkach kompozytu, prowadzi się w zasadzie przy użyciu różnicowego kalorymetru skaningowego. Używane w tego rodzaju badaniach próbki są niewielkie. Wobec dużej niejednorodności kompozytów w małej skali, ustalenie średniej zawartości PCM w produkowanym na skalę masową wyrobie wymaga zrobienia wiele testów, co jest kłopotliwe i kosztowne. Poszukuje się zatem szybkiej metody, która może znaleźć zastosowanie w przemysłowej kontroli jakości i dotyczyć będzie stosunkowo dużych próbek.

W Oak Ridge National Laboratory, do pomiarów zawartości materiału fazowo-zmiennego w próbkach kompozytów, opracowywana jest dynamiczna metoda z użyciem aparatu płytowego [3, 4, 5]. Aparat płytowy służy w zasadzie do pomiarów współczynnika przewodności cieplnej materiałów w stanie ustalonego przewodzenia ciepła. Może być jednakże wykorzystany również do pomiarów dynamicznych własności cieplnych próbek badanych materiałów, w których wyrównanie się strumienia ciepła zachodzi stosunkowo wolno, ze względu na postępującą przemianę fazową. Nowoczesne aparaty płytowe pozwalają na zmiany temperatury obu płyt w szerokim zakresie i na ciągłą rejestrację temperatury i strumienia ciepła na obu płytach. Jednak przy bardzo szybkich zmianach tem-

peratury trzeba się liczyć z obniżeniem dokładności pomiaru.

3. BILANS CIEPŁA PŁYTKI Z MATERIAŁEM FAZOWO-ZMIENNYM

Modelem materiału, w którym zachodzi przemiana fazowa i równocześnie nie występują przepływy fazy ciekłej, może być ośrodek o zmiennym cieple właściwym, zależnym od temperatury. Jednowymiarowe równanie transportu ciepła w takim materiale ma postać następującą:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

gdzie ρ i λ oznaczają gęstość i przewodność materiału, natomiast h i T gęstość entalpii i temperaturę. Pochodna entalpii względem temperatury, przy stałym ciśnieniu, reprezentuje efektywne ciepło właściwe, którego składową jest ciepło przemiany fazowej:

$$c_{eff} = \frac{\partial h}{\partial T}. \quad (2)$$

Całkując równanie (1) po grubości płytki d i po czasie w przedziale $[t_1, t_2]$ otrzymuje się równanie bilansu ciepła płytki, które wiąże zmianę entalpii w jej objętości z ilością ciepła, które przepłynęło przez obydwie powierzchnie. Po zmianie porządku całkowania:

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_0^d \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) dx dt = \int_0^d \rho \Delta h(x, t_1, t_2) dx = \int_{t_1}^{t_2} [q(0) - q(d)] dt$$

$$q(x, t) = -\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad (4)$$

q jest gęstością strumienia ciepła. Przyrost gęstości entalpii Δh w punkcie x w przedziale czasu $[t_1, t_2]$, związany ze zmianą temperatury, jest dany wyrażeniem:

$$\Delta h(x, t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial h}{\partial t} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial h}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} dt = \int_{T(x, t_1)}^{T(x, t_2)} c_{eff}(x, T) dT \quad (5)$$

Całkę z $c_{eff}(x, T)$ po temperaturze można wykonać, gdy znany jest rozkład temperatury w stanie końcowym; w szczególnych przypadkach można to zrobić bez rozwiązywania zagadnienia przewodzenia ciepła.

W przypadku materiału, który powstaje w wyniku dodania PCM do izolacji z włókna celulozowego

$$c_{eff} = (1 - \alpha) c_{ins} + \alpha c_{effPCM}, \quad (6)$$

gdzie α oznacza udział wagowy PCM a c_{ins} ciepło właściwe izolacji bez tego dodatku. Ciepło właściwe materia-

łu na bazie wosków, co ilustruje wykres na rysunku 2, wykazuje niewielki wzrost już w stosunkowo niskich temperaturach, od 6°C, następnie duży wzrost i następujący po nim spadek w okolicach temperatury 26°C, kiedy zachodzi przemiana fazowa, i jest praktycznie stałe po całkowitym stopieniu tego materiału, przy czym jest nieznacznie niższe niż w niskich temperaturach. Można to zapisać:

$$c_{effMicr}(T) = c_l + (c_{effPCM}(T) - c_l) \quad (7)$$

gdzie c_l reprezentuje ciepło właściwe w fazie ciekłej. Całka po przedziale temperatury, obejmującym zakres przemiany fazowej, reprezentuje całkowitą gęstość entalpii H_m związanej z tą przemianą:

$$\int_{T_1}^{T_2} (c_{effPCM}(T) - c_l) dT = H_m \quad (8)$$

Rozważmy proces asymptotycznego przejścia od początkowego stanu ustalonego przewodzenia ciepła w płytce, przy temperaturach brzegowych T_{0l} i T_{dl} , do stanu końcowego, który też jest stanem ustalonego przewodzenia ciepła, przy temperaturach brzegowych wyższych o ΔT . Załóżmy, że temperatury T_{0l} i T_{dl} są odpowiednio niskie, natomiast ich wzrost o ΔT powoduje całkowite stopienie materiału fazowo-zmiennego w płytce. Po wykonaniu całki w równaniu (5), przy uwzględnieniu (6), (7) i (8) oraz założeniu stałej gęstości i przewodności cieplnej, równanie bilansu (3) dla rozważanego procesu przyjmuje postać:

$$\int_{t_1}^{t_2} [q(0) - q(d)] dt = \rho d \{ c_{ins} \Delta T + \alpha [(c_l - c_{ins}) \Delta T + H_m] \} \quad (9)$$

Równanie to może stanowić podstawę do wyznaczania zawartości materiału fazowo zmiennego w próbce, przy znanych charakterystykach tego materiału i samej izolacji, i przy możliwości ciągłej rejestracji strumienia ciepła i regulacji temperatury na obu jej powierzchniach. Należy zaznaczyć, że sam przebieg procesu przejścia między dwu stanami ustalonego przewodzenia ciepła nie jest istotny. Rozważania podobne do przeprowadzonych powyżej pozwalają na oszacowanie stałej czasowej procesu wyrównywania się strumienia ciepła w płytce po nagłej zmianie temperatury na jej powierzchni. Przy upraszczającym założeniu, że opór próbki R nie zależy od temperatury i że przebieg procesu opisuje krzywa eksponencjalna, można oszacować jego stałą czasową τ_s , która silnie zależy od zawartości PCM, w sposób podobny jak próbek materiałów konwencjonalnych [6, 7, 8]:

$$\tau_s = R \cdot \rho \cdot d \cdot \frac{\Delta H_s}{\Delta T} \quad (10)$$

$$\Delta H_s = \int_0^d \frac{x}{d^2} \int_{T(x,t_1)}^{T(x,t_2)} c_{eff}(T) dT dx \quad (11)$$

ΔH_s reprezentuje tu tę część całkowitej zmiany entalpii próbki, związanej z przemianą fazową i zmianą temperatury, która jest efektem przepływu ciepła przez powierzchnię płyty chłodniejszej.

4. DYNAMICZNA METODA TESTOWANIA MATERIAŁÓW ZAWIERAJĄCYCH PCM

Dynamiczna metoda testowania próbek kompozytów zawierających PCM, przy użyciu aparatu płytowego, polega na obserwowaniu tempa wyrównywania się strumienia ciepła na jednej z płyt po nagłym podwyższeniu temperatury o ΔT na płycie przeciwnej i porównywaniu jego przebiegów z krzywymi wzorcowymi.

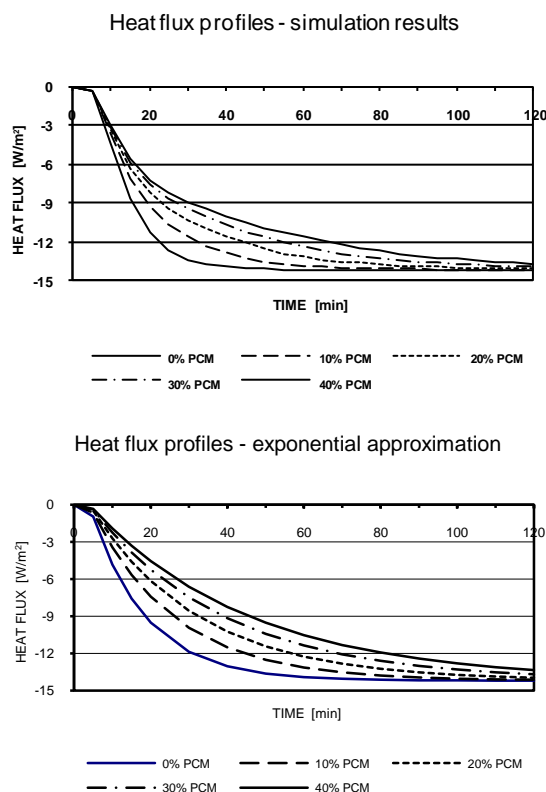
W tabeli 1 zestawiono stałe czasowe procesu wyrównywania się strumienia ciepła, przy różnicy temperatur 28°C, w przypadku próbek izolacji o grubości 7.6 cm, zawierających w różnych proporcjach PCM o całkowitym ciepłe topnienia 121 kJ/kg. Przemiana fazowa zachodzi w przedziale temperatury od 25°C do 28.9°C. W końcowym stanie ustalonym strefa całkowitego stopienia PCM, sięgająca do miejsca, gdzie temperatura przekracza 28.9°C, obejmuje połowę próbki; za nią jest strefa przejściowa o grubości 1.3 cm i strefa o grubości 1.5 cm, o temperaturze poniżej 25°C, gdzie pozostaje on w stanie stałym.

Tabela 1 Szacowane stałe czasowe próbek izolacji z PCM o grubości 7.6 cm

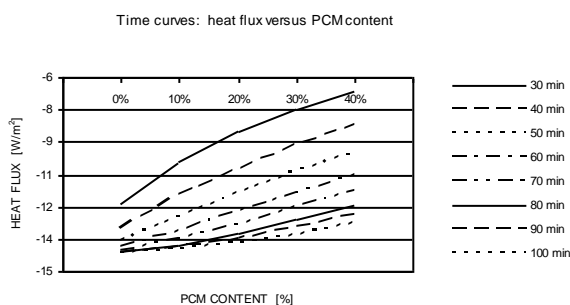
Table 1 Estimated time constants for the blend samples of thickness 7.6 cm.

PCM content [%]	τ_s [min]
0	14.7
10	21.3
20	28.0
30	34.7
40	41.4

Na rysunku 3 pokazano przebiegi strumienia ciepła na płycie chłodnej, przy różnych zawartościach PCM w próbkach, wyznaczone w drodze symulacji numerycznej i przy zastosowaniu przybliżenia eksponencjalnego, ze stałymi czasowymi z tabeli 1, natomiast na rysunku 4 pokazano krzywe czasowe strumienia ciepła na płycie chłodnej (górnej), tzn. zależności strumienia ciepła od zawartości PCM w próbkach po upływie czasu od 30 do 100 minut, licząc od skokowego wzrostu temperatury na przeciwnej (dolnej) płycie aparatu.



Rys. 3 Strumień ciepła na płycie chłodnej przy różnych zawartościach PCM; symulacja i przybliżenie eksponencjalne
 Fig. 3 Heat flux profiles for different PCM content; simulation and exponential approximation



Rys. 4 Profile czasowe strumienia ciepła na płycie chłodnej przy różnych zawartościach PCM w próbkach
 Fig. 4 Time curves: heat flux at the cold plate for different PCM content in a sample

5. PODSUMOWANIE

Z porównania wykresów widać, że przybliżenie eksponencjalne przebiegu wyrównywania się strumienia ciepła dość dobrze oddaje przebieg procesu i może być wykorzystane przy planowaniu eksperymentu, nie jest jednakże

na tyle dokładne, aby mogło stanowić podstawę wyznaczania zawartości PCM w próbkach. Wydaje się, że lepsze rezultaty mogłaby dawać metoda oparta na równaniu bilansu (9). Założenie o stałej przewodności cieplnej, które przyjmuje się przy jego wyprowadzeniu, nie odgrywa zasadniczej roli przy małej różnicy początkowych i końcowych temperatur brzegowych.

DYNAMIC TEST METHOD OF PCM CONTENT IN FIBEROUS INSULATION

Summary: Dynamic test method of PCM content in fibrous insulation is considered. Heat balance of a sample of material with PCM is analyzed. Time constants for 7.6 cm thick samples of PCM-Enhanced Cellulose Insulation are estimated.

Literatura

- [1] Heim, D. & Klemm, P. 2003. Numerical solution of TIM-PCM solar thermal storage system with ESP-r. Research in Building Physics, Carmeliet, J. & Hens, H. & Vermeir G. (ed.), Balkema Publishers: 683-690.
- [2] Heim D., Clarke J.A., Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r, Energy and Building, 36 (2004) 795-805.
- [3] Kośny J., Yarbrough D.W., Wilkes K.E., Leuthold D., Syad A., PCM-Enhanced Cellulose Insulation – Thermal Mass in Lightweight Natural Fibres, 2006 ECOSTOCK Conference, IEA, DOE, Richard Stockton College of New Jersey, June 2006.
- [4] Kośny J., Yarbrough D.W., Miller W.A., Wilkes K.E., Lee E.S., Analysis of the dynamic thermal performance of fibrous insulations containing phase change materials, 11th International Conference on Thermal Energy Storage; Effstock 2009 - Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability, Stockholm, Sweden.
- [5] Kośny J., Yarbrough D.W., Kossecka E., Use of a Heat-Flow Meter to Determine Active PCM Content in an Insulation. 30th International Thermal Conductivity Conference, Pittsburgh, PA USA, 2009.
- [6] Kossecka E., Kośny J., Hot Box Testing of Building Envelope Assemblies; a Simplified Procedure for Estimation of Minimum Time of the Test; Journal of Testing and Evaluation, Vol. 36, Issue 3, 242-249 (2008).
- [7] Kossecka E., Relationships between structure factors, response factors and z-transfer function coefficients for multilayer walls. ASHRAE Transactions 104(1), 1998, s. 68-77.
- [8] Kossecka E., Kośny J., Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building, Energy & Buildings; Vol. 34, No. 4, 321-331 (2002).