

Dorota A. CHWIEDUK¹

WYBRANE PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW PCM W BUDOWNICTWIE

Istnieją różne możliwości ograniczenia wpływu oddziaływania środowiska na wnętrze budynku, a w konsekwencji na ograniczenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania lub chłodzenia. Jedną z innowacyjnych metod jest zastosowanie materiałów zmienno-fazowych tzw. PCM (*Phase Change Materials*), zintegrowanych ze strukturą budynku. W referacie zawarto wybrane informacje dotyczące stosowania materiałów zmienno-fazowych PCM w budownictwie, a także przedstawiono wyniki własnych analiz. Efektywne zwiększenie pojemności cieplnej budynku, bez zwiększania jego masy, a wręcz zmniejszając ją, można osiągnąć poprzez zastosowanie rozważanych materiałów zmienno-fazowych. Materiały PCM stosowane w budownictwie ulegają przemianie fazowej (topnienie-zestalenie) o bardzo dużej entalpii przemiany, zachodzącej w zakresie zmian temperatury w pomieszczeniu. Materiały te są w stanie przejąć duży strumień ciepła nieznacznie tylko zmieniając swoją temperaturę. W referacie przedstawiono podstawowe technologie integracji materiałów zmienno-fazowych z materiałami budowlanymi. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego procesów cieplnych zachodzących w zewnętrznych przegrodach budowlanych zawierających materiał PCM przeprowadzono obliczenia symulacyjne dynamiki procesów cieplnych zachodzących w takich przegrodach w zmiennych warunkach otoczenia zewnętrznego z uwzględnieniem oddziaływania promieniowania słonecznego. W referacie przedstawiono interpretację graficzną wybranych wyników analiz symulacyjnych zachowania się przykładowej przegrody nieprzezroczystej i przezroczystej obudowy budynku. Na podstawie wyników tej analizy sformułowano wnioski co do celowości stosowania pewnych rozwiązań strukturalno – materiałowych obudowy budynku zawierających materiały PCM w naszych warunkach klimatycznych.

Słowa kluczowe: PCM, przegrody przezroczyste, symulacja komputerowa

1. Wprowadzenie

Wpływ czynników środowiska zewnętrznego, takich jak temperatura powietrza, opady, wiatr, wilgotność i promieniowanie słoneczne na bilans energetyczny budynku zależy od tego gdzie jest on zlokalizowany, jak został zaprojekt-

¹ Dorota A. Chwieduk, dr hab. inż., prof. PW; Politechnika Warszawska, MEiL, Instytut Techniki Ciepłej, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa; dchwied@itc.pw.edu.pl

towany i wykonany. Oddziaływanie środowiska zewnętrznego dotyczy całej obudowy. Zależy od konstrukcji, struktury i materiałów, z których przegroda jest wykonana. Istotne jest także umieszczenie poszczególnych elementów obudowy względem siebie. Przegroda może być pełna o jednej powierzchni zewnętrznej, lub też może składać się z kilku różnych elementów o zróżnicowanych powierzchniach, np. ściana zewnętrzna z oknem, drzwiami, balkonem itp. W konsekwencji przepływ ciepła przez całą przegrodę, jak i jej poszczególne elementy jest zróżnicowany. Znaczenie ma też rodzaj powierzchni zewnętrznej przegrody w odniesieniu do jej parametrów optycznych i cieplnych. Przegroda lub jej powierzchnia może być przezroczysta i charakteryzować się jej właściwą transmisyjnością, absorpcyjnością i refleksyjnością dla promieniowania słonecznego, lub nieprzezroczysta i wtedy jej własności opisuje jedynie absorpcyjność i refleksyjność dla promieniowania słonecznego. Dowolna powierzchnia wykazuje także określone ciepłe właściwości radiacyjne wyrażone jej absorpcyjnością i emisyjnością cieplną. Wskutek oddziaływania środowiska zewnętrznego na budynek może wystąpić mniej lub bardziej znaczące zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania lub na chłód.

Istnieją różne możliwości ograniczenia wpływu oddziaływania środowiska na wnętrze budynku, a w konsekwencji na ograniczenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania lub chłodzenia. Jedną z innowacyjnych metod jest zastosowanie materiałów zmienno-fazowych tzw. PCM (*Phase Change Materials*), zintegrowanych ze strukturą budynku. Zainteresowanie tą nową technologią energetyczno – budowlaną jest ostatnio bardzo duże, i to zarówno od strony prowadzonych prac naukowo- badawczych, jak i gotowych produktów dostępnych na rynku [1], [2], [3].

2. Rola materiałów zmienno-fazowych wbudowanych w strukturę budynku

Materiały zmienno-fazowe PCM są wykorzystywane do zwiększenia pojemności cieplnej materiałów budowlanych. Ograniczenie przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne jest osiąganе zarówno dzięki stosowaniu materiałów o dużej oporności cieplnej, tj. o wysokiej izolacyjności cieplnej, jak i materiałów o dużej pojemności cieplnej. Te drugie powinny być wykorzystywane nie tylko na przegrody zewnętrzne, w szczególności na ich wewnętrzną warstwę, ale także na wewnętrzne. Rolę materiałów magazynujących mogą pełnić materiały PCM, z reguły są to kompozyty materiałów budowlanych, które w swoim składzie zawierają materiały zmienno-fazowe. Do rozpowszechnienia stosowania materiałów PCM w budownictwie przyczyniły się problemy z efektywnym wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego. Podstawowym problemem związanym z wykorzystaniem tej energii jest bowiem jej okresowość oraz niekoherentność pomiędzy czasem i wielkością promieniowania słonecznego, a czasem i wielkością obciążeń grzewczych. Dlatego też tak istotne

przy wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego jest magazynowanie pozyskanego ciepła zarówno w skali krótko, jak i długoterminowej. Ciepło powstające w wyniku konwersji fototermicznej zachodzącej w elementach obudowy budynku jest w nich magazynowane przez różny okres czasu w zależności od ich pojemności cieplnej. Wykorzystywana jest w tym przypadku zdolność danego materiału do magazynowania ciepła wyznaczona przez jego ciepło właściwe. Ciepło właściwe jest wyrażane w $\text{kJ}/(\text{kgK})$ i opisuje ciepło możliwe do zmagazynowania przez 1 kg danego materiału przy różnicy temperatury 1 K. Pojemność cieplną opisuje poza ciepłem właściwym danego ośrodka także gęstość i objętość danego materiału. W krajach wyższych szerokości geograficznych stosuje się masywne przegrody zewnętrzne i często wewnętrzne, dużych rozmiarów i o dużym ciężarze (duża gęstość), w celu zapewnienia dużej pojemności cieplnej.

Efektywne zwiększenie pojemności cieplnej budynku, bez zwiększania jego masy, a wręcz zmniejszając ją, można osiągnąć poprzez zastosowanie rozważanych materiałów zmiennofazowych. Duża pojemność cieplna tych materiałów jest wynikiem ich zdolności do akumulowania dużej ilości ciepła przy względnie stałej temperaturze, przy której pozostają w stanie ciekłym. W skutek przemiany fazowej zestalania do otoczenia oddawane jest ciepło utajone. Materiały PCM stosowane w budownictwie charakteryzują się zdolnością do pochłaniania ciepła, będąc w stanie ciekłym w temperaturze pokojowej. Gdy temperatura w pomieszczeniu spada, np. nocą, zachodzi wspomniana przemiana fazowa zestalania i ciepło jest oddawane do otoczenia, czyli występuje funkcja ogrzewania pomieszczenia. Natomiast w ciągu dnia, gdy temperatura wzrasta na skutek oddziaływania promieniowania słonecznego, zachodzi przemiana topnienia. W czasie przemiany z fazy stałej do ciekłej, fazy topnienia, ciepło jest pobierane z otoczenia, czyli występuje chłodzenie pomieszczenia. Metoda stosowania materiałów PCM do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń została zaproponowana już w latach 70-tych ubiegłego wieku, jednak wyraźny postęp w jej wdrażaniu obserwuje się dopiero w ostatnich latach. Bowiem dopiero niedawno opracowano technologie wytwarzania trwałych elementów budowlanych z materiałami PCM.

Materiały zmiennofazowe są wykorzystywane do pełnienia aktywnych funkcji energetycznych. Powinny one bowiem podlegać cyklicznej przemianie fazowej, pochłaniając ciepło, gdy jest jego nadmiar w pomieszczeniu, i uwalniając ciepło, gdy jest na nie zapotrzebowanie. Przemiany pochłaniania i uwalniania ciepła powinny być wymuszane przez czynniki naturalne. Czynniki takimi w ciągu dnia jest wspomniane oddziaływanie promieniowania słonecznego i wysoka temperatura, która jest konsekwencją oddziaływania promieniowania słonecznego, ale może także wynikać z dużej mocy wewnętrznych źródeł ciepła, urządzeń elektrycznych, w szczególności komputerów. Wysoka temperatura powoduje topnienie materiału. Z kolei nocą niska temperatura powoduje zestalenie materiału.

W przypadku materiałów PCM wbudowanych w strukturę budynku, materiały takie mogą być częścią tradycyjnych materiałów budowlanych: betonowych, gipsowych, pustaków, lub tworzyć swoiste zasobniki ciepła w wolnych przestrzeniach struktury budynku. Stosowanie materiałów PCM poprawia bilans cieplny budynku w cyklu całorocznym, dzięki umożliwieniu w ciągu dnia magazynowania energii słonecznej w elementach budynku, takich jak ściany, posadzki i stropy, lub innych specjalnie zaprojektowanych zasobnikach, i oddawaniu zmagazynowanego ciepła do pomieszczeń z przesunięciem fazowym, nocą. Zjawiska te mogą służyć zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia budynków.

3. Analiza przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne z materiałem PCM na podstawie symulacji komputerowej zachodzących zjawisk

Badania dotyczące stosowania materiałów PCM zintegrowanych z obudową budynku prowadzone są od wielu lat w różnych ośrodkach badawczych. W ramach prac prowadzonych przez autorkę badano procesy zachodzące w nieprzezroczystej przegrodzie zewnętrznej z wkomponowanym materiałem PCM [4]. W tym opracowaniu przeprowadzono rozważania dotyczące przegród przezroczystych, co jest rzadko przedmiotem publikowanych prac badawczych.

Rozważane są przegrody przezroczyste zintegrowane z lekkim panelem pojemnościowym z PCM. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla przegród o różnej strukturze zawierającej materiał zmiennofazowy. Rozważane panele z PCM są dostępne na rynku w postaci płyt o nazwie *Energain* (firmy *Dupont*), który zawiera 60% wosku parafiny. Jego podstawowe parametry termofizyczne przedstawiają się następująco:

- temperatura topnienia $21,7^{\circ}\text{C}$,
- ciepło przemiany fazowej 70 kJ/kg ,
- ciepło właściwe fazy stałej $2,2\text{ kJ/(kgK)}$,
- gęstość 856 kg/m^3 ,
- przewodność cieplna fazy stałej $0,18\text{ W/(m K)}$,
- przewodność cieplna fazy ciekłej $0,14\text{ W/(m K)}$.

Przeprowadzono obliczenia symulacyjne przepływu ciepła przez przezroczyste elementy obudowy budynku z potencjalnym zastosowaniem elewacyjnych elementów z PCM. Rozważane przezroczyste elewacyjne elementy obudowy stanowią przegrody słoneczne pasywne. Przegrody pasywne będące przedmiotem rozważań są przegrodami tzw. zysków bezpośrednich, czyli promieniowanie słoneczne dociera do wnętrza budynku bezpośrednio jako fala elektromagnetyczna w stopniu zależnym od transmisyjności tej przegrody. Rozważane przegrody są wielowarstwowe. Składają się z przeszkleń i warstw z materiałem PCM, w różnych ich konfiguracjach. Rozważane przegrody jako

pasywne przegrody słoneczne nie mogą zawierać izolacji cieplnej. Powinny być zwrócone w kierunku południowym, ze względu na największe napromienienie słoneczne w skali roku.

Przeprowadzono szereg obliczeń symulacyjnych dla różnych struktur przeszklonej elewacji. Na rysunkach 1-4 zamieszczono wyniki tylko dla wybranych rozwiązań struktur przeszklonej elewacji są to:

1. Przegroda elewacyjna A: szkło zwykłe - 0,006 m; PCM - 0,01 m; szkło zwykłe 0,006 m, łączna grubość = 0,022 m;
2. Przegroda elewacyjna B: szkło zwykłe - 0,006 m; powietrze - 0,014 m, szkło niskoemisyjne (powłoka od wewnątrz) 0,006 m; PCM - 0,01 m, łączna grubość = 0,036 m.

Wybrane przegrody, ich struktura są czysto hipotetyczne. Przedmiotem analizy jest określenie zasadności stosowania materiałów PCM w przegrodach przezroczystych i podanie ewentualnych wskazań, co do konfiguracji poszczególnych warstw względem siebie. Przegroda A ma trzy warstwy, dwie szklane a w środku PCM (warstwa 2). Druga przegroda B jest grubsza ma łączną grubość 0,036 m i cztery warstwy. Jedną z nich jest warstwa powietrzna (warstwa 2), dwie warstwy szklane mają powłoki niskoemisyjne, a warstwa PCM jest od wewnątrz (warstwa 4). Przegroda ma kontakt z otoczeniem zewnętrznym i wewnętrznym. Przyjęto, że materiał zmienno-fazowy może stanowić dowolną warstwę przegrody, przy czym każda warstwa (przegrody) jest jednorodna i izotropowa. Parametry warstwy z PCM, tj. przewodność cieplna i ciepło właściwe, są zmienne w czasie. Pozostałe warstwy mają parametry termofizyczne stałe w czasie.

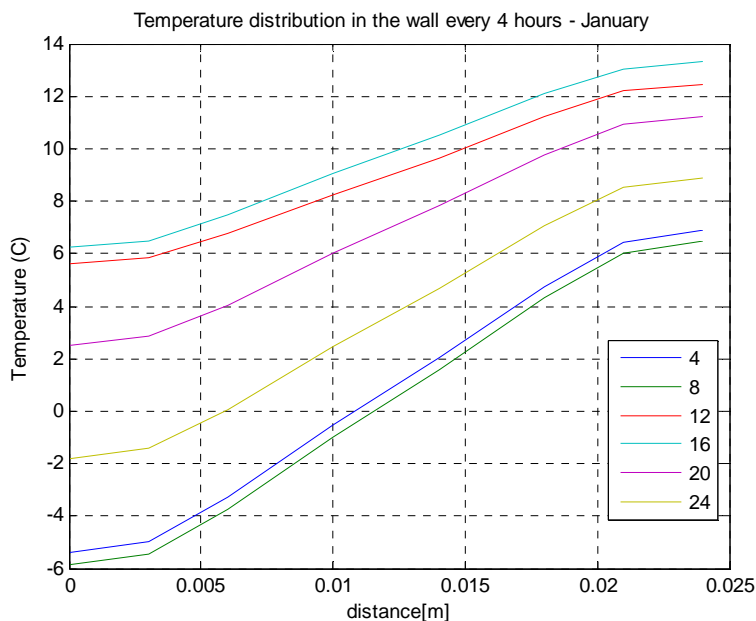
Temperatura przemiany fazowej rozważanego materiału zmienno-fazowego *Energain* odpowiada $21,7^{\circ}\text{C}$. Co oznacza, że proces przemiany fazowej może odbywać się w zakresie bliskim tej temperaturze. Przyjęto, że wymagana wewnątrz budynku temperatura powietrza wynosi 22°C (w celu stworzenia warunków ciepłych – temperaturowych, bliskich temperaturze przemiany fazowej).

Analizy symulacyjne zostały przeprowadzone dla całego uśrednionego roku reprezentowanego przez uśrednione dane godzinowe parametrów otoczenia zewnętrznego (temperaturę powietrza, temperaturę niebosłonu, promieniowanie słoneczne bezpośrednie i dyfuzyjne) w uśrednionym każdym miesiącu rozpatrywanego roku. W referacie przedstawiono wyniki dla miesiąca stycznia i lipca. Miesiące te reprezentują bowiem dwie skrajne pory roku, zimą i latem, którym odpowiadają odpowiednio zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania i na chłód. Na rysunkach 1 i 2 dla dwóch konfiguracji warstw przegrody przezroczystej o strukturze A, B, dla miesiąca stycznia I i lipca VII przedstawiono wykresy rozkładu temperatury we wnętrzu przegrody i na jej powierzchniach, co 4 godziny począwszy od 4 rano do 24 godziny w nocy.

Część przegrody zewnętrznej zawierająca PCM, lub cała przegroda, jeśli cała zawiera PCM, powinny stanowić swoisty zasobnik ciepła funkcjonujący w zmiennych w czasie warunkach ciepłych. Praca zasobnika zwykle odbywa

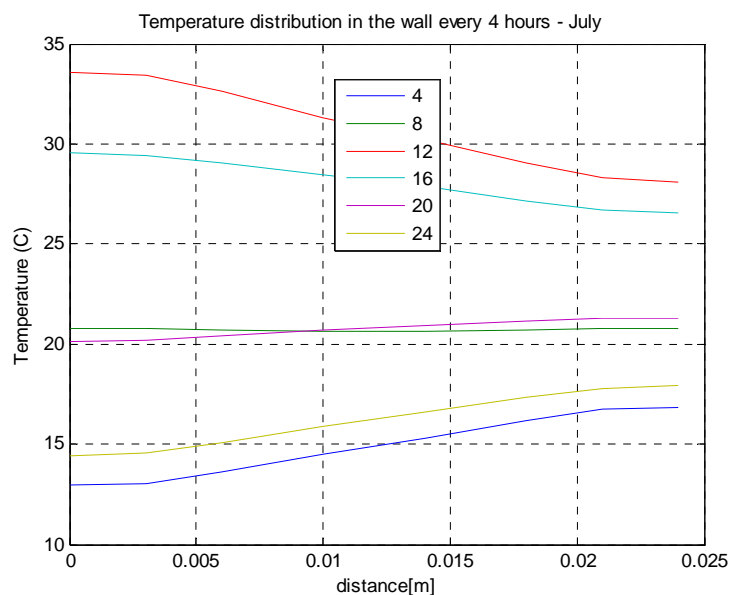
się w dwóch podstawowych cyklach, cyklu ładowania, kiedy w odpowiednich warunkach następuje pobieranie dostępnego ciepła, zgodnie z wielkością pojemności cieplnej materiału (faza ciekła) i cyklu rozładowania, kiedy następuje oddanie wcześniej pozyskanego ciepła (przejście fazy ciekłej do stałej – zestalenie materiału). Niestety w rozpatrywanych przypadkach trudno jest zauważyć takie funkcjonowanie materiału PCM zwłaszcza w warunkach zimowych naszego klimatu.

Model matematyczny zjawisk zachodzących podczas przepływu ciepła przez obudowę budynku został przedstawiony w literaturze[4], [5]. Wymiana ciepła odbywa się pomiędzy otoczeniem wewnętrznym – pomieszczeniem budynku, a środowiskiem zewnętrznym – otoczeniem zewnętrznym budynku. Otoczenie zewnętrzne jest reprezentowane przez obiekty bliskim sąsiedztwie, i w dalszym, tj. pozornym nieboskłonem. Rozważania przepływu ciepła przez przegrodę z materiałem PCM przeprowadza się w odniesieniu do efektywnego ciepła właściwego przemiany fazowej. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego sformułowano program numeryczny w środowisku MATLAB symulujący zjawiska zachodzące w różnych przegrodach obudowy budynku z materiałem PCM.

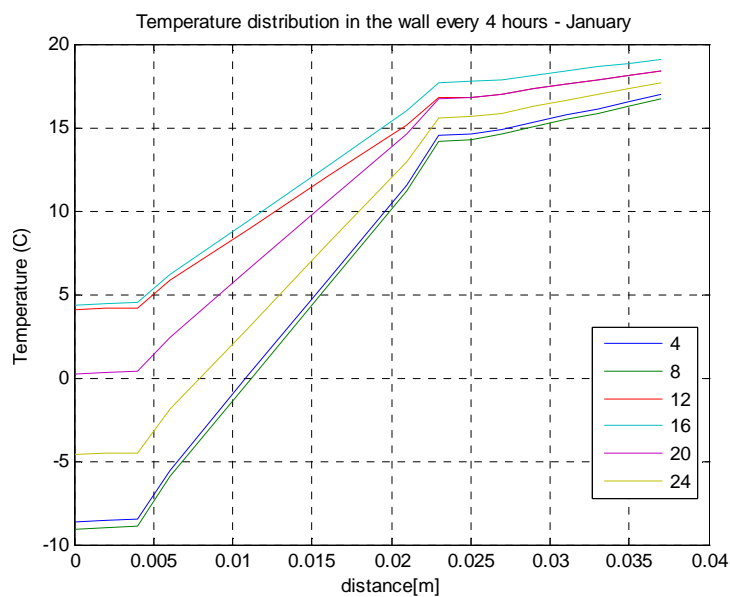


Rys. 1. Rozkład temperatury w przegrodzie A w uśrednionym dniu stycznia co 4 godziny

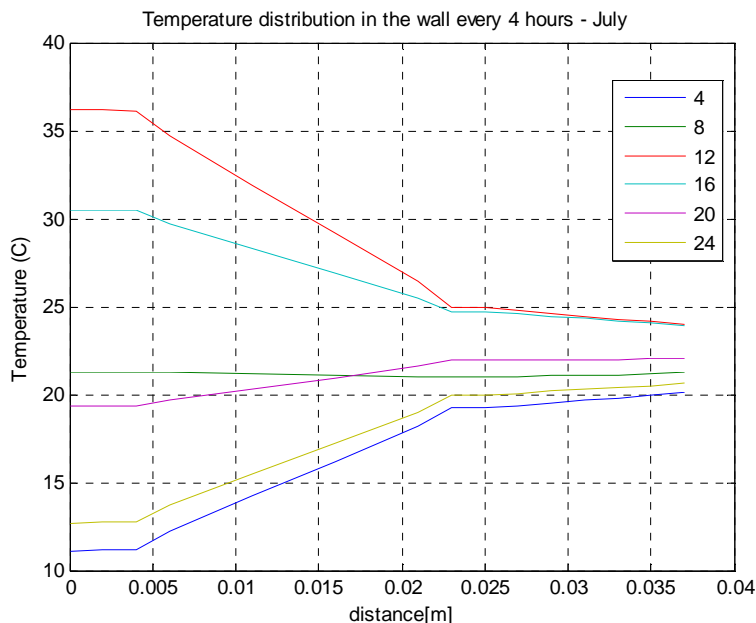
Fig. 1. Temperature distribution in partition A in average day of January, calculated every 4 hours



Rys. 2. Rozkład temperatury w przegrodzie A w uśrednionym dniu lipca co 4 godziny
Fig. 2. Temperature distribution in partition A in average day of July, calculated every 4 hours



Rys. 3. Rozkład temperatury w przegrodzie B w uśrednionym dniu stycznia co 4 godziny
Fig. 3. Temperature distribution in partition B in average day of January, calculated every 4 hours



Rys. 4. Rozkład temperatury w przegrodzie B w uśrednionym dniu lipca co 4 godziny

Fig. 4. Temperature distribution in partition B in average day of July, calculated every 4 hours

W przypadku przegrody A zimą nie występują warunki do zaistnienia przemiany fazowej. Temperatury w przezroczystej przegrodzie są znacznie poniżej temperatury przemiany fazowej. Z kolei latem jedynie koło godziny 8 rano istnieją warunki, aby taka przemiana mogła zajść. Jednakże od tego czasu rozpoczyna się intensywne oddziaływanie promieniowania słonecznego, materiał PCM nie jest w stanie złagodzić – ograniczyć przepływ ciepła do wnętrza. Materiał PCM w przegrodzie A ani zimą, ani latem nie spełnia swojej funkcji.

W przypadku przegrody B podobnie jak poprzednio zimą nie występują warunki do zaistnienia przemiany fazowej. Temperatury w przezroczystej przegrodzie są poniżej temperatury przemiany fazowej. Z kolei latem sytuacja jest zdecydowanie lepsza niż w przypadku poprzednim. Można zauważyć, że materiał PCM funkcjonuje zapewniając nocą i rano temperaturę bliską wymaganej. Jednakże w ciągu dnia, gdy rozpoczyna się intensywne oddziaływanie promieniowania słonecznego, materiał PCM ogranicza wzrost temperatury, czyli przepływ ciepła do wnętrza jest zmniejszony. Materiał PCM w przegrodzie B zimą nie spełnia swojej funkcji, ale latem jego oddziaływanie jest już widoczne i wpływa on na poprawę warunków komfortu temperaturowego w budynku i jego poszczególnych pomieszczeniach.

4. Podsumowanie

Analiza wyników symulacji numerycznej dynamiki rozważanych przegród przezroczystych pozwala na wysnucie pewnych wniosków ilościowych i jakościowych. Można wskazać na pewne preferencje, co do struktury przezroczystych przegród zewnętrznych. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone rozważania, nie mają charakteru jednoznacznych wytycznych, co do stosowania odpowiednich warstw materiałów zmiennofazowych, nie są też obliczeniami optymalizacyjnymi. Wyniki obliczeń pozwalają sformułować wnioski, co do zalecanych rozwiązań przegród przezroczystych z PCM. Otóż można stwierdzić, że w warunkach krajowych zimą przegrody przezroczyste z materiałem PCM nie spełniają swoich funkcji. Efekt pojemnościowy związany z zaistnieniem przemiany fazowej i wykorzystania ciepła przemiany fazowej nie ma warunków do zaistnienia. Temperatury przegrody są poniżej temperatury przemiany fazowej. Wynika to z braku warstwy izolacyjnej przegrody, Celowe byłoby więc zastosowanie warstwy przezroczystej dla promieniowania słonecznego pełniącej jednocześnie funkcje izolacji cieplnej. Taką warstwę może stanowić izolacja transparentna.

Latem warunki wykorzystania ciepła przemiany fazowej w celu odbioru ciepła z pomieszczenia (zmniejszenia temperatury) mają większe szanse wystąpienia. Co prawda wskazane byłoby stosowanie większej grubości warstwy PCM w celu spełnienia wymaganej funkcji magazynowania ciepła i wpływu na komfort cieplny pomieszczeń budynku. Stosowanie izolacji transparentnej przyczyniłoby się także do intensyfikacji procesów powodujących zaistnienie warunków przemiany fazowej w przegrodzie transparentnej. Można więc stwierdzić, że przegroda przezroczysta w warunkach naszego klimatu powinna też spełniać warunki odpowiedniej izolacyjności cieplnej, co może być osiągnięte dzięki zastosowaniu wspomnianej izolacji transparentnej.

Prace wykonywane były w ramach realizacji projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”; PO-IG.01.01.02-10-106/09-03.

Literatura

- [1] Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout Ch.: A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*. vol. 40, 2008, pp. 394–398.
- [2] Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Di H.: Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment*. vol. 42, 2007, pp. 2197–2209.
- [3] Zalba B., Martyn J.M., Cabeza L.F., Mehling H.: Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*: vol. 23, No 25, 2003, pp. 251–283, *Applied Thermal Engineering*: vol. 23, No 25, 2003, pp. 251–283.

- [4] Chwieduk D. Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries. *Energy* 59 (2013) pp. 301-313.
- [5] Chwieduk D. (2011) *Energetyka Słoneczna Budynku*. Arkady, Warszawa.

SOME EXAMPLES OF UTILISATIONS OF PCM IN BUILDING STRUCTURES

S u m m a r y

There are various opportunities to reduce impact of the environment on the interior of the building and consequently, to reduce the demand for energy for heating or cooling. Effective increase of the heat capacity of the building, without increasing its weight or even reducing it, can be achieved through the use of phase change materials. The paper presents the basic technology of phase change material integration with building envelope. Some selected problems of utilization of PCM - Phase Change Materials in transparent elements of building structures are described. Calculations of building dynamics has been performed and heat transfer through transparent partitions has been determined for different structures of these partitions. The paper presents a graphical interpretation of selected results of simulation studies, the behavior of the sample transparent and non-transparent partitions building envelope is shown. Results indicate that because of hard winter conditions transparent walls need thermal insulation. To assure this and keep transparent features of the transparent partitions the transparent insulation can be applied combined with PCM incorporated into glazing.

Keywords: PCM, transparent partitions, simulation studies

Przesłano do redakcji: 12.06.2015 r.

Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.33