

## **DYNAMIKA CIEPLNA BUDYNKU WYKONANEGO Z ELEMENTÓW MODYFIKOWANYCH MFZ**

**Anna MACHNIEWICZ, Dariusz HEIM**

*Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska  
ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, e-mails: [anna.machniewicz@p.lodz.pl](mailto:anna.machniewicz@p.lodz.pl), [dariusz.heim@p.lodz.pl](mailto:dariusz.heim@p.lodz.pl)*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki analiz numerycznych historii zmian temperatury w pomieszczeniu o zróżnicowanej konstrukcji przegrody zewnętrznej. Przeanalizowano cztery przypadki o różnie zdefiniowanej pojemności cieplnej oraz zdolności magazynowania ciepła utajonego. Do analizy wybrano cztery okresy trzydziestu dni, każdy rozpoczynający się w dniu o założonej, charakterystycznej temperaturze zewnętrznej, determinującej chwilową moc strat ciepła przez analizowaną przegrodę. Celem pracy było określenie efektu i potencjału wykorzystania elementów modyfikowanych Materiałami Fazowo Zmiennymi w celu zwiększenia pojemności cieplnej obudowy oraz stabilizacji temperatury w pomieszczeniu o niekontrolowanych parametrach środowiska wewnętrznego. Parametrami poddanymi analizie były chwilowe różnice temperatury w pomieszczeniu w poszczególnych przypadkach oraz czas po którym dana temperatura została osiągnięta. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że modyfikacja konstrukcji lekkiej za pomocą MFZ może przyczynić się do uzyskania okresowych (do 4 dni) charakterystyk termicznych podobnych jak w przypadku zastosowania konstrukcji masywnej.

**Słowa kluczowe:** przegroda, pojemność cieplna, Materiały Fazowo Zmienne (MFZ), dynamika cieplna, symulacja

### **1. WPROWADZENIE**

Wymogi stawiane nowoprojektowanym budynkom, pod kątem efektywności energetycznej, w głównej mierze skupiają się na zwiększeniu izolacyjności cieplnej obudowy. Niemniej jednak, zwiększenie efektywności energetycznej budynku oraz zmniejszenie zapotrzebowania na energię może być realizowane na wiele innych sposobów. Oprócz wpływu parametrów fizyko-budowlanych na końcowe zużycie energii znaczący wpływ mają również dynamicznie zmieniające się warunki klimatu zewnętrznego oraz sposób użytkowania budynku –

wprowadzające zakłócenia parametrów środowiska wewnętrznego. Oznacza to, że określenie optymalnych charakterystyk fizycznych przegród budowlanych jest możliwe dla uśrednionych lub chwilowych wartości parametrów termicznych otaczającego środowiska. Z tego natomiast wynika fakt, że nie istnieje jedno rozwiązanie konstrukcyjne, które zapewniłoby maksymalną efektywność energetyczną w ciągu całego roku.

Nowe podejście, określające parametry przegród zewnętrznych zakłada, że w procesie optymalizacji istotne są nie tylko straty ciepła na drodze przenikania ale również udział zysków ciepła w całkowitym bilansie cieplnym [1]. Wielkości te nie są aktualnie wykorzystywane do projektowania parametrów fizycznych ścian zewnętrznych ale są uwzględniane przy wyznaczeniu zapotrzebowania na energię. Stosując metodę miesięczną i sezonową możliwe jest wyznaczenie czynnika wykorzystania zysków ciepła do ogrzewania (czynnika wykorzystania zysków dla chłodzenia) będącego funkcją zysków ciepła do strat ciepła oraz parametru uwzględniającego bezwładność cieplną budynku. Uwzględnienie pojemności cieplnej budynku pozwala na określenie dynamiki zmian parametrów klimatu wewnętrznego na skutek zmian parametrów klimatu zewnętrznego. Ustabilizowanie warunków wewnętrznych jest istotne ze względu zarówno na komfort cieplny użytkowników jak i na szczytową moc systemów ogrzewania/chłodzenia.

### **2. POJEMNOŚĆ CIEPLNA OBUDOWY BUDYNKU**

Zgodnie z przedstawionym podejściem, elementy obudowy zewnętrznej budynku powinny spełniać nie

tylko funkcję ochrony przed stratami ciepła, ale także wspomagać pasywne chłodzenie w okresie zwiększonych zysków ciepła (zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych). Zwiększenie masy termicznej obudowy budynku prowadzi do zwiększenia bezwładności cieplnej czyli wydłużenia czasu reakcji na zmieniające się warunki. Może to mieć wpływ na zmniejszenie mocy szczytowej systemów, ustabilizowanie temperatury wewnątrz pomieszczeń. Niemniej jednak, w szczególnych przypadkach, zwiększona pojemność cieplna obudowy budynku może mieć również negatywny skutek. Dotyczy to pomieszczeń użytkowanych i ogrzewanych okresowo, w których niezbędne jest wydłużenie czasu pracy instalacji grzewczej.

Wpływ masy termicznej na możliwość oszczędności energii na ogrzewanie i chłodzenie jest problemem badanym od ponad dwudziestu lat, lecz nadal aktualnym. W literaturze można znaleźć rezultaty rozważań na temat wpływu rozkładu masy termicznej na grubości przegrody [2] oraz próby wprowadzenia współczynników charakteryzujących dynamikę termiczną ścian, uwzględniających zarówno przewodność cieplną jak i pojemności cieplną warstw obudowy budynku [3]. Wiele artykułów zostało również poświęconych zagadnieniu stałej czasowej budynku, jako dynamicznego parametru do oceny przegród [4] oraz sposobów jej wyznaczania na podstawie badań in-situ [5].

Problemem cały czas aktualnym i pozostających bez odpowiedzi jest sposób oceny dynamiki cieplnej budynku wykonanego z elementów modyfikowanych Materiałami Fazowo Zmiennymi (MFZ). Metody normowe, analityczne pozwalają uwzględnić jedynie efekt magazynowania ciepła jawnego, pomijając akumulację ciepła wydzielanego na skutek przemian fazowych lub chemicznych. Przedmiotem analizy przedstawionej w poniższej pracy jest określenie możliwości zwiększenia pojemności cieplnej obudowy budynku poprzez wykorzystanie izotermicznego magazynowania ciepła. W zależności od chwilowej mocy strat (zysków) ciepła określono potencjał tego typu rozwiązania.

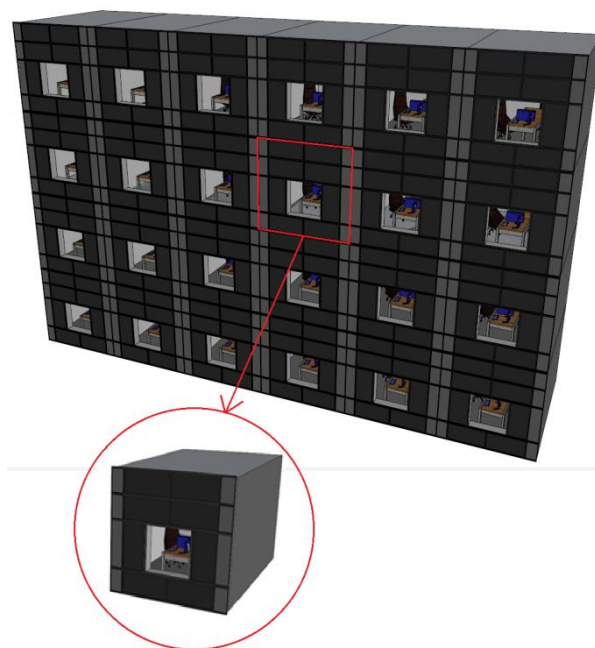
### 3. ANALIZOWANE PRZYPADKI

Do analizy przyjęto dwa typy konstrukcji obudowy zewnętrznej budynku – lekką i ciężką, z czego każda z nich została dodatkowo zmodyfikowana MFZ (Tabela 2). Analizie poddano zatem cztery przypadki:

1. L – konstrukcja lekka, wełna mineralna na płycie G-K.

2. LM – konstrukcja lekka, modyfikowane MFZ poprzez dodanie 1 cm warstwy materiału od strony wewnętrznej.
3. C – konstrukcja ciężka, żelbetowa, ocieplona od zewnątrz, o współczynniku przenikania ciepła jak w przypadku konstrukcji lekkiej.
4. CM – konstrukcja ciężka, modyfikowane MFZ poprzez dodanie 1 cm warstwy materiału od strony wewnętrznej.

Analizę numeryczną powyższych rozwiązań przeprowadzono za pomocą metody symulacyjnej opisanej w pracy [6] przy pomocy programu ESP-r. Ze względu na zastosowanie MFZ przyjęto pięciominutowy krok czasowy obliczeń. Jako modelowe pomieszczenie przyjęto pomieszczenie testowe, zaprojektowane na potrzeby realizacji projektu GPEE [7]. Jest to pojedyncze pomieszczenie biurowe, użytkowane przez dwie osoby, którego fasada wykonana w systemie wentylowanym pokryta jest panelami fotoelektrycznymi (Rysunek 1).



Rys. 1. Wizualizacja analizowanego budynku i pomieszczenia.  
Fig. 1. View of the analysed building and office room.

Założono, że pomieszczenie to będzie wyposażone w system grzewczy (chłodniczy), utrzymujący stałą temperaturę na poziomie 20°C. Przyjęto wentylację na poziomie 60 m<sup>3</sup>/h, współczynnik przenikania ciepła dla ścian  $U=0,16$  W/m<sup>2</sup>K oraz dla okna  $U=0,7$  W/m<sup>2</sup>K. Dla tak przyjętych wartości wyznaczono współczynnik

przenoszenia ciepła przez przenikanie i wentylację równy 22 W/K.

Na podstawie przedstawionych powyżej założeń, analizie poddano cztery przypadki zróżnicowane pod względem chwilowej mocy strumienia ciepła, wyrażonej jako iloczyn współczynnika przenoszenia ciepła i różnicy temperatur w chwili  $t_n(T_e)$  (temperatury powietrza wewnętrznego i chwilowej temperatury powietrza zewnętrznego):

$$q_n(t_n) = H(T_i - T_e) [W] \quad (1)$$

gdzie:

$$t_n(T_e) = \begin{cases} t_1 \text{ dla } T_e = -10 \text{ }^\circ\text{C} \\ t_2 \text{ dla } T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C} \\ t_3 \text{ dla } T_e = 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ t_4 \text{ dla } T_e = 30 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

Analizie poddano przebieg zmian temperatury wewnątrz pomieszczenia, następujący po wyłączeniu systemu ogrzewania w chwili  $t_n(T_e)$ . Przyjęto trzy przypadki, w których w chwili początkowej temperatura zewnętrzna jest niższa od temperatury powietrza wewnętrznego oraz jeden przypadek, kiedy temperatura ta jest wyższa. Sposób oznaczenia kolejnych przypadków oraz wartości obliczonych chwilowych mocy strat/zysków ciepła  $q_n$  przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Analizowane przypadki.  
Table 1. Analysed cases.

Moc strat i zysków ciepła	Dzień $t_n(T_e)$	Konstrukcja			
		Lekka	Lekka +MFZ	Ciężka	Ciężka +MFZ
$q_1(-10 \text{ }^\circ\text{C}) = 660 \text{ W}$	20.01	L_q1	LM_q1	C_q1	CM_q1
$q_2(0 \text{ }^\circ\text{C}) = 440 \text{ W}$	01.12	L_q2	LM_q2	C_q2	CM_q2
$q_3(10 \text{ }^\circ\text{C}) = 220 \text{ W}$	02.09	L_q3	LM_q3	C_q3	CM_q3
$q_4(30 \text{ }^\circ\text{C}) = 220 \text{ W}$	15.08	L_q3	LM_q4	C_q4	CM_q4

Analiza klimatu zewnętrznego, na podstawie danych typowego roku meteorologicznego (TMY) wyznaczonego wg procedury opisanej w pracy [8] opracowanych dla Łodzi, pozwoliła na wybranie odpowiednich okresów (ich punktów początkowych odpowiadających chwili  $t_n(T_e)$ ), w których badane będzie stygnięcie budynku. Każdorazowo przeanalizowany został okres trzydziestu dni od momentu wyłączenia systemu ogrzewania – chwili  $t_n(T_e)$ .

Tabela 2. Charakterystyka MFZ.  
Table 2. PCM properties.

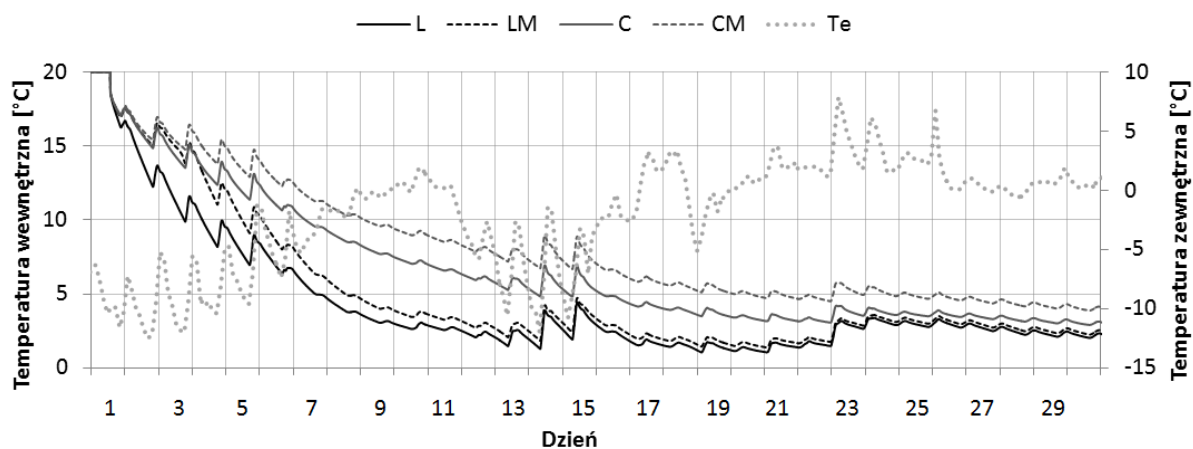
Przypadek	Ciepło przemiany [KJ/kg]	Temperatura topnienia $T_M$ [ $^\circ\text{C}$ ]	Temperatura krzepnięcia $T_S$ [ $^\circ\text{C}$ ]
$q_1$	150	18	19
$q_2$	150	18	19
$q_3$	150	20	21
$q_4$	150	25	26

Jako parametr oceny i porównania przebiegów zmian temperatury wewnątrz pomieszczenia przyjęto czas, w którym temperatura osiąga charakterystyczną wartość minimalną lub maksymalną.

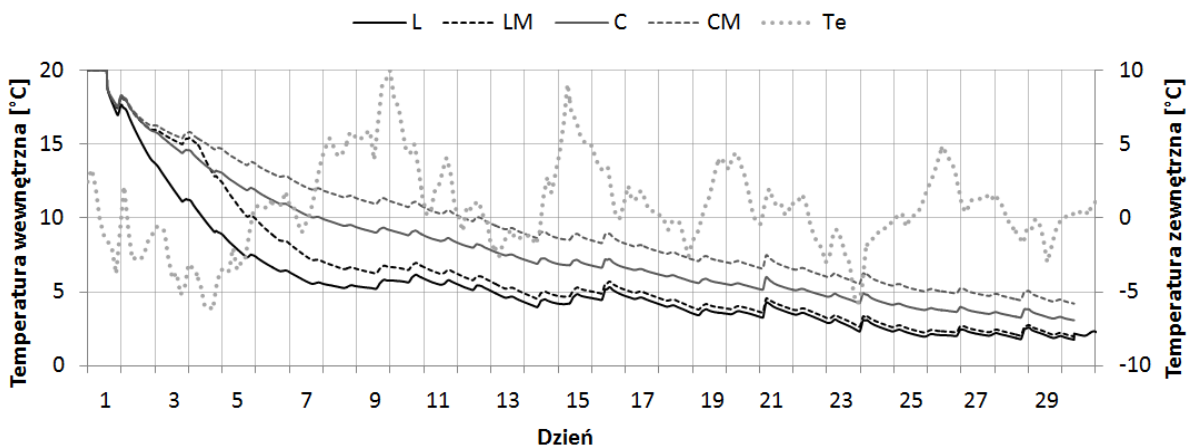
#### 4. WYNIKI I ICH ANALIZA

Wyniki przeprowadzonych analiz zostały przedstawione na Rysunkach 2÷5. Na podstawie przebiegu zmian temperatury wewnątrz pomieszczenia, przedstawionego na Rysunku 2, można zauważyć, że zarówno zwiększenie masy termicznej konstrukcji jak i zastosowanie MFZ skutkuje uzyskaniem zbliżonych efektów termicznych. W ciągu pierwszych trzech dni po wyłączeniu systemu ogrzewczego, konstrukcja ciężka (C) oraz lekka modyfikowana MFZ (LM) pozwoliły na utrzymanie takiej samej temperatury, 4  $^\circ\text{C}$  wyższej niż dla konstrukcji lekkiej (L). Można również zaobserwować, że zwiększenie pojemności cieplnej budynku skutkuje znaczeni wolniejszym wychładzaniem pomieszczenia. Temperatura równa 5  $^\circ\text{C}$  została osiągnięta dla przypadku konstrukcji ciężkiej modyfikowanej MFZ (CM) dopiero po dwóch tygodniach od momentu, kiedy taką samą temperaturę można było zaobserwować dla przypadku obudowy lekkiej.

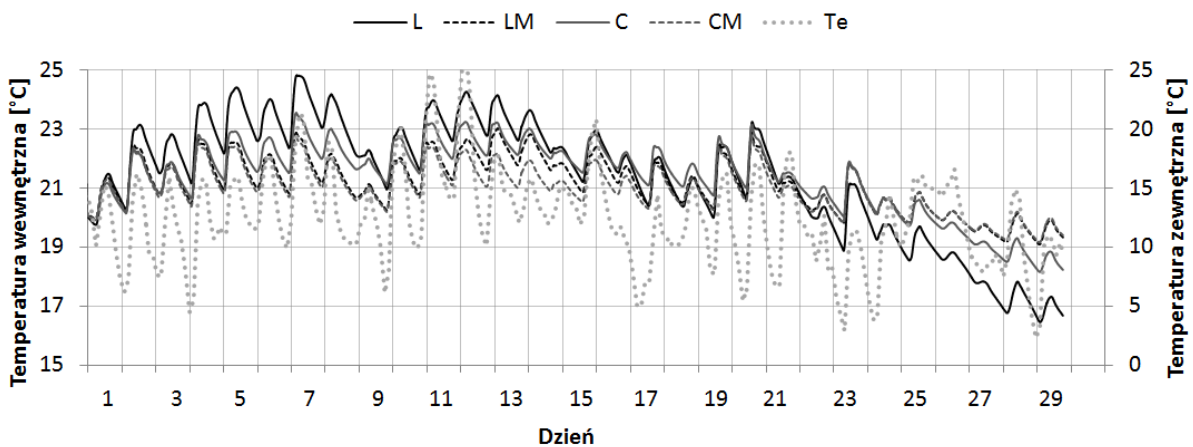
Na skutek zmniejszonej mocy strat ciepła  $q_2$  (Rysunek 3) i mniej dynamicznych zmian temperatury zewnętrznej, rozwiązania konstrukcji modyfikowanej MFZ (przypadki LM i CM) pozwoliły na utrzymanie temperatury wewnątrz pomieszczenia na poziomie temperatury przemiany fazowej, przez pierwsze trzy dni analizowanego okresu. Po tym czasie, na skutek utraty zdolności akumulacji ciepła utajonego przez zastosowany MFZ, przebieg zmian temperatur był zbliżony jak w przypadku mocy strat ciepła  $q_1$ . Różnica czasu, po którym w pomieszczeniu osiągnięta jest temperatura równa 5  $^\circ\text{C}$ , dla dwóch skrajnych przypadków, to dwa tygodnie.



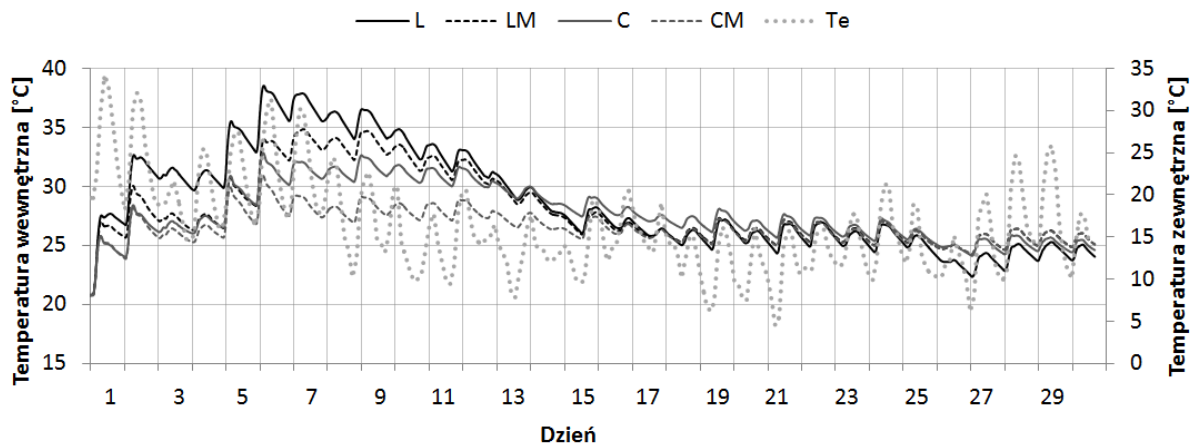
Rys. 2. Przebieg zmian temperatury dla mocy strat ciepła  $q_1$ .  
 Fig. 2. History of temperature changes for heat flux  $q_1$ .



Rys. 3. Przebieg zmian temperatury dla mocy strat ciepła  $q_2$ .  
 Fig. 3. History of temperature changes for heat flux  $q_2$ .



Rys. 4. Przebieg zmian temperatury dla mocy strat ciepła  $q_3$ .  
 Fig. 4. History of temperature changes for heat flux  $q_3$ .



Rys. 5. Przebieg zmian temperatury dla mocy strat ciepła  $q_4$ .  
Fig. 5. History of temperature changes for heat flux  $q_4$ .

Wyniki przedstawione na Rysunku 4 pokazują, że pomimo wahań temperatury zewnętrznej w zakresie od 10°C do 15°C, wyłączenie systemu ogrzewczego nie spowodowało znacznego wychłodzenia pomieszczeń, niezależnie od analizowanej konstrukcji obudowy zewnętrznej budynku. Temperatura wewnątrz pomieszczenia, wahająca się w cyklu dobowym na skutek okresowych zysków ciepła od promieniowania słonecznego, utrzymywała się na poziomie komfortu termicznego. Niemniej jednak, można zauważyć, że modyfikacja MFZ zarówno konstrukcji ciężkiej jak i lekkiej, pozwoliła na zapewnienie stabilnych parametrów temperaturowych wewnątrz pomieszczenia. W pierwszej części analizowanego okresu czasu pozwoliła na utrzymanie najniższej temperatury (najbliższej 20°C), natomiast w ostatnich dniach, zastosowanie MFZ pozwoliło zapobiec wychłodzeniu pomieszczenia i pomogło utrzymać temperaturę nawet o 7°C wyższą niż dla konstrukcji lekkiej.

Ostatni z analizowanych przebiegów zmian temperatury otrzymany został dla najcieplejszego okresu czasu występującego w zadanej lokalizacji. Na podstawie wyników przedstawionych na Rysunku 5 można zaobserwować, że podobnie jak poprzednio, zwiększenie pojemności cieplnej budynku poprzez zarówno zwiększenie masy obudowy jak i jej modyfikację za pomocą MFZ daje zbliżony efekt również w zakresie ochrony przed przegrzewaniem (w zakresie temperatur przemiany fazowej MFZ).

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki analiz numerycznych dla pomieszczenia o konstrukcji obudowy zewnętrznej charakteryzującej się zadaniem, niskim współczynnikiem przenikania ciepła. Przypadki zróżnicowano pod względem masy termicznej oraz zdolności akumulacji ciepła utajonego.

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników analizy można stwierdzić, że zarówno w okresie ogrzewczym jak i chłodniczym zwiększenie pojemności cieplnej obudowy wpływa korzystnie na utrzymanie temperatury wewnątrz pomieszczenia. Ponadto można zauważyć, że właściwie dobrane parametry MFZ zastosowanego wraz z konstrukcją lekką pozwalają na osiągnięcie efektów porównywalnych do konstrukcji ciężkiej. Ponadto, dzięki niemal izotermicznej akumulacji ciepła utajonego, przegroda modyfikowana MFZ wykazuje zdolność dynamicznego reagowania na zmieniające się strumienie zysków ciepła. Pozwala to na szybsze akumulowanie nadmiarów energii oraz jej uwalnianie w zadanych zakresach temperatur.

### THERMAL DYNAMICS OF THE BUILDING CONSTRUCTED FROM ELEMENTS MODIFIED BY PCM

**Summary:** The paper presents the results of numerical analyses of the rooms varied by the structure of the outer partition. Four cases of differently defined heat capacity and latent heat storage were analyzed. Simulations were performed for four 30-days periods, starting on the day with assumed, characteristic

external temperature, which determined the instantaneous power of heat exchange through the analyzed partition. The aim of the study was to describe the potential of application of elements modified by phase change materials (PCM) and define the effect of its application on the increase of the heat capacity and stabilization of room temperature under uncontrolled parameters of the internal environment. The parameters analyzed were temporary differences of room temperature and the time after which the temperature has been reached (in comparison to other cases). Based on these results it can be concluded that the modification of the light structure with PCM can contribute to a thermal effects similar to those in the case of the use of massive structures.

#### Literatura

- [1] D. Heim, Charakterystyka regulacji, które będą miały wpływ na rynek materiałów izolacyjnych, *Izolacje*, 4/2015.
- [2] P.T. Tsilingiris, Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures, *Energy and Buildings* 38, 2006, s. 1200–1211.
- [3] E. Kossecka, J. Kosny, Relations between structural and dynamic thermal characteristics of building walls, in: *Proceedings of International Symposium of CIB W67 "Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings"*, Vienna, August 4–10, 1996, s. 627–632.
- [4] P.T. Tsilingiris, On the thermal time constant of structural walls, *Applied Thermal Engineering* 24, 2004, s.743–757
- [5] R.C. Sonderegger, Diagnostic tests determining the thermal response of a house, *Transactions of ASHRAE (Part 1)*, 1978, s. 691–702.
- [6] J.A. Clarke, *Energy simulation in building design*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford 2001.
- [7] <http://gpee.net>
- [8] P. Narowski, D. Heim, Dane klimatyczne dla potrzeb modelowania transportu ciepła i wilgoci w przegrodach budowlanych, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, tom 3, s.85-92, Łódź, 2008.

---

*Niniejsza praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt.: „Promowanie zrównoważonego podejścia do efektywności energetycznej w budownictwie jako narzędzia ochrony klimatu w miastach Niemiec i Polski: opracowanie technologii fasady dla potrzeb budynków o zerowej emisji” (GPEE).*