

WPLYW KONFIGURACYJNYCH ROZWIĄZAŃ WARSTWY PRZESZKLENIA NA ENERGETYCZNE FUNKCJONOWANIE ZMODYFIKOWANEJ PRZEGRODY KOLEKTOROWO – AKUMULACYJNEJ

Lech LICHOLAŁ^{*}, Aleksander STARAKIEWICZ, Joanna KRASOŃ, Przemysław MIĄSIK

*Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego ul. Poznańska 2, 35-955 Rzeszów,
e-mail: Lech.Licholai@prz.edu.pl, olekstar@prz.edu.pl, jkras@prz.edu.pl, pmiasik@prz.edu.pl*

Streszczenie: Przy projektowaniu i wznoszeniu budynków istotną uwagę przywiązuje się do energooszczędnych zagadnień, dotyczących eksploatacyjnego funkcjonowania tych obiektów. Korzystną charakterystykę energetyczną budynków można osiągnąć przy pomocy różnych metod, mających oparcie w naukowych zagadnieniach fizyki budowli. Przyszłościowym kierunkiem jest wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do poprawy bilansu cieplnego budynków o założonym użytkowym przeznaczeniu. Wśród różnych technologicznych rozwiązań ścian zewnętrznych, przegroda kolektorowo – akumulacyjna jest interesującą propozycją południowych, elewacyjnych struktur budynków.

Celem rozważań, przedstawionych w niniejszym artykule jest określenie wpływu parametrów przeszkleń na pracę cieplną przegrody kolektorowo – akumulacyjnej zawierającej materiał zmiennie – fazowy. W badaniach wykorzystano przeszkleń o różnych wartościach współczynników przenikania ciepła oraz przepuszczalności całkowitego promieniowania słonecznego. Przedstawiono interpretację graficzną uzyskanych wyników badań zachowania się przegrody kolektorowo – akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmiennie – fazowym oraz trzema rodzajami przeszkleń. Na podstawie wyników badań sformułowano wnioski dotyczące celowości stosowania określonych rozwiązań strukturalno – materiałowych obudowy budynków w warunkach klimatycznych Polski.

Słowa kluczowe: przeszkleń, przegroda kolektorowo – akumulacyjna, materiał zmiennie - fazowy, badania doświadczalne

1. WSTĘP

Badania nad wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego do ogrzewania budynków prowadzone są z różną intensywnością od ponad 50 lat w wielu krajach świata. Przechodziły one różne fazy rozwoju związane z poszukiwaniem optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych

i materiałowych. Podstawowe dwa elementy konstrukcyjne przegrody kolektorowo – akumulacyjnej, kolektor i magazyn ciepła, poddawane są ciągłej ewaluacji i badaniom w poszukiwaniu efektywniejszych rozwiązań. Oba te elementy są ściśle ze sobą powiązane poprzez wzajemne oddziaływanie. Od kolektora (przeszkleń) oczekuje się wysokiej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego (g) oraz wysokiej izolacyjności cieplnej (U_g). Od magazynu ciepła oczekuje się wysokiej pojemności cieplnej, dobrego przewodnictwa w czasie nagrzewania, niskich strat ciepła w fazie chłodzenia oraz przekazania jak największej ilości energii cieplnej do wnętrza pomieszczenia. Niektóre parametry fizyczne jakimi charakteryzuje się przeszkleń i materiał akumulacyjny wzajemnie się przeciwstawiają. Dlatego też przeprowadzono badania przegrody kolektorowo – akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmiennie – fazowym z trzema rodzajami przeszkleń. Celem badań było określenia wpływu danego rodzaju przeszkleń na efektywność cieplną przegrody kolektorowo – akumulacyjnej.

W artykule [1] przedstawiono rozważania dotyczące wyznaczenia stabilności termicznej ściany zewnętrznej modyfikowanej materiałem zmiennofazowym w okresie charakteryzującym się niską temperaturą zewnętrzną i wysokim natężeniem promieniowania słonecznego. Przeprowadzono analizę rozkładu temperatur w przekroju ściany w układzie niestacjonarnym. Zaproponowana w pracy metoda analityczna dotycząca tłumienia amplitudy wahań temperatur przez przegrody modyfikowane warstwą materiału zmiennofazowego pozwoliła na ilościowe określenie możliwości stabilizacji temperatury przegrody poprzez zastosowanie materiału o właściwościach zmiennofazowych. W artykule stwierdzono, że wprowadzenie warstwy materiału zmiennofazowego do przegrody

^{*}Autor korespondencyjny, e-mail: Lech.Licholai@prz.edu.pl

zewnętrznej przyczyniło się do stabilizacji temperatury w zakresie temperatur przemiany fazowej w warstwie materiału zmiennofazowego, jak również do zmniejszenia wahań temperatury w całej przegrodzie. Artykuł [2] zawiera informacje na temat możliwości stosowania materiałów zmiennofazowych w budownictwie, a także wyniki własnych analiz. W artykule przedstawiono technologie integracji materiałów zmiennofazowych z materiałami budowlanymi. Istotną składową artykułu są przeprowadzone obliczenia symulacyjne dynamiki procesów cieplnych zachodzących w przegrodach modyfikowanych materiałami zmiennofazowymi. Analizę wykonano biorąc pod uwagę zmienne warunki otoczenia zewnętrznego wraz z oddziaływaniem promieniowania słonecznego. Interesujące są wnioski odnoszące się do efektywności stosowania takich rozwiązań w polskich warunkach klimatycznych. W artykule [3] zawarto wyniki z badań dotyczących zastosowania materiałów zmiennofazowych w przegrodach kolektorowo-akumulacyjnych. Przedstawiono rezultaty uzyskane z analiz teoretycznych oraz z przeprowadzonych badań eksperymentalnych dotyczących różnych konfiguracji przegród zewnętrznych modyfikowanych materiałem zmiennofazowym. Badania prowadzono w okresie letnim i zimowym. W przegrodzie wykonano otwory umożliwiające cyrkulację powietrza. Zastosowanie materiału zmiennofazowego poprawiło stabilizację termiczną badanych układów przegród zewnętrznych. Artykuł [4] zawiera rozważania dotyczące możliwości zastąpienia grubych i ciężkich ścian zewnętrznych przez cienkie i lekkie przegrody, przy jednoczesnym utrzymaniu podobnego poziomu komfortu przez cały rok. Dla osiągnięcia tej zmiany rozpatrzono w artykule panele z materiałem zmiennofazowym wkomponowane w strukturę ściany zewnętrznej. Analizy funkcjonowania ścian wykonano poprzez modelowanie równowagi energetycznej w pomieszczeniu uwzględniając zyski i straty ciepła przez ściany. Przeprowadzono symulacje dla różnych typów struktury ścian w zmieniających się warunkach pogodowych. Wykazano, że istnieje możliwość stosowania lekkich zewnętrznych ścian wyposażonych w panele z materiałem zmiennofazowym jako alternatywy dla ciężkich, standardowych ścian zewnętrznych. W artykule [5] przedstawiono rozważania dotyczące zastosowania materiałów zmiennofazowych do wspomagania wentylacyjnych systemów w budynkach, dla zmniejszenia konwencjonalnego zapotrzebowania energetycznego przeznaczonego na potrzeby chłodzenia budynków. Zaproponowane w artykule systemy wyposażone w materiały zmiennofazowe zwiększają efektywność funkcjonowania systemów wentylacyjnych w budynkach. W artykule [6] przedstawiono wyniki badań dotyczących funkcjonowania przegrody kolektorowo-akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmiennofazowym. Badania przeprowadzono w komorze z południową ścianą w postaci przegrody kolektorowo-

akumulacyjnej, poddanej oddziaływaniu rzeczywistych parametrów klimatu zewnętrznego. Materiał zmiennofazowy umieszczono od strony zewnętrznej warstwy masowej przegrody kolektorowo-akumulacyjnej wykonanej z elementów ceramicznych. Badania przeprowadzono w krótkim okresie czasowym (miesiąc kwiecień), jednak zarejestrowano zmniejszenie strat ciepła z pomieszczenia znajdującego się za przegrodą kolektorowo-akumulacyjną.

2. METODYKA BADAŃ

Badania zostały przeprowadzone w komorze symulacyjnej, w warunkach laboratoryjnych. Komora podzielona jest na dwie części badawcze, z których, w jednej założono symulowaną temperaturę powietrza zewnętrznego (komora zimna), w drugiej natomiast temperaturę powietrza wewnętrznego ustaloną dla pomieszczenia użytkowego w budynku (komora ciepła). Pomiędzy komorowe części badawcze wprowadzono przegrodę kolektorowo – akumulacyjną. Od strony komory zimnej podczas badań, oprócz narzuconej temperatury zewnętrznej, symulowano energię cieplną promieniowania słonecznego za pomocą płyty grzejnej. Ogólny widok badanej przegrody przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Widok badanej przegrody od strony komory ciepłej
Fig. 1. View of the testing barrier from hot side

Badania zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu trzech wariantów przegród. Elementem zmiennym było przeszklenie (P1, P2, P3), które charakteryzowało się różnymi parametrami termofizycznymi (izolacyjnością cieplną U_g i całkowitą przepuszczalnością promieniowania słonecznego g).

Celem badań było określenie wpływu danego przeszklenia na ciepłe funkcjonowanie zmodyfikowanej przegrody kolektorowo – akumulacyjnej, po okresie działania płyty grzejnej symulującej energię promieniowania słonecznego.



Rys. 2. Widok badanej przegrody od strony komory zimnej
Fig. 2. View of the testing barrier from cold side

Podczas prowadzonych badań ustalono w komorze zimnej stałą temperaturę 0°C. W komorze ciepłej przyjęto temperaturę +20°C.

Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową założono o wartości około 590 W/m². Wielkość tą, przyjęto jako maksymalną dzienną średnią z całego sezonu grzewczego (od października do kwietnia), przy wykorzystaniu typowego roku meteorologicznego dla stacji Rzeszów – Jasionka. Przy każdym wariancie przegrody wartość natężenia promieniowania słonecznego została zredukowana o współczynnik całkowitej przepuszczalności promieniowania słonecznego dla danego przeszklenia. Pomniejszona wielkość została zasymulowana przez płytę grzejną, która została umieszczona między przeszkleniem a warstwą materiału zmienno - fazowego.

Rozkład temperatur w przegrodzie określono przy pomocy czujników temperatury umieszczonych w przekroju ściany. Od strony komory ciepłej na powierzchni ściany ceramicznej założono czujniki gęstości strumienia ciepła (Rys.1).

Każdy wariant przegrody został poddany działaniu nagrzewania tą samą stałą wartością energii cieplnej przez sześć godzin. Po zakończeniu procesu nagrzewania wykonano analizę - na podstawie wartości temperatur - przejścia fali termicznej przez przegrodę oraz wpływu danego przeszklenia na rozkład tych temperatur.

2.1. Charakterystyka badanych przegród

W przegrodzie kolektorowo – akumulacyjnej założono stałe elementy dla trzech wariantów: mur składający się z ceramiki

poryzowanej grubości 300 mm, warstwa PCM grubości 20 mm, usytuowana od strony komory zimnej. Właściwości fizyczne tych materiałów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości materiałów wykorzystanych w badanych przegrodach
Table 1. The properties of each of the materials used in the studied barriers

Materiał / Parametry fizyczne	Pustak ceramiczny	PCM	Szyba zespolona
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	~810	880	P1: 833 P2: 750 P3: 682
Temperatura topnienia [°C]	-	22÷26	-
Temperatura krzepnięcia [°C]	-	26÷22	-
Ciepło właściwe [kJ/kg·K]	1,0	2,0	0,84
Ciepło utajone [kJ/kg]	-	230	-
Współczynnik przewod. ciepła [W/m·K]	0,20	0,20	P1: 0,112 P2: 0,096 P3: 0,035

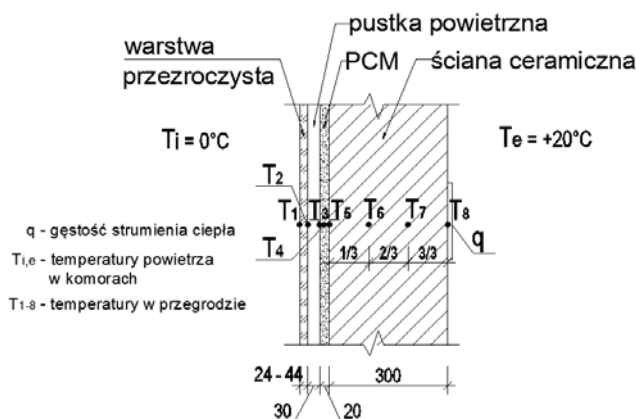
Przeszklenie charakteryzujące się odmiennymi parametrami, umieszczono za warstwą materiału zmienno - fazowego od strony zimnej. Parametry przeszkleń wykorzystanych w badaniach przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry przeszklenia
Table 2. Parameters of glazing

Rodzaj przeszklenia	Budowa szyby zespolonej	U _g	g	Grubość szyby zespol.
-	-	W/m ² K	%	mm
Szyba zespolona 1-komorowa P1	4/16Ar/4	2,6	83	24
Szyba zespolona 2-komorowa P2	4/14/4/14/4	1,7	76	40
Szyba zespolona 2-komorowa P3	4/16/4/16/4	0,7	62	44

Do przeprowadzenia symulacji całkowitego promieniowania słonecznego między warstwą PCM a przeszkleniem umieszczono płytę grzewczą.

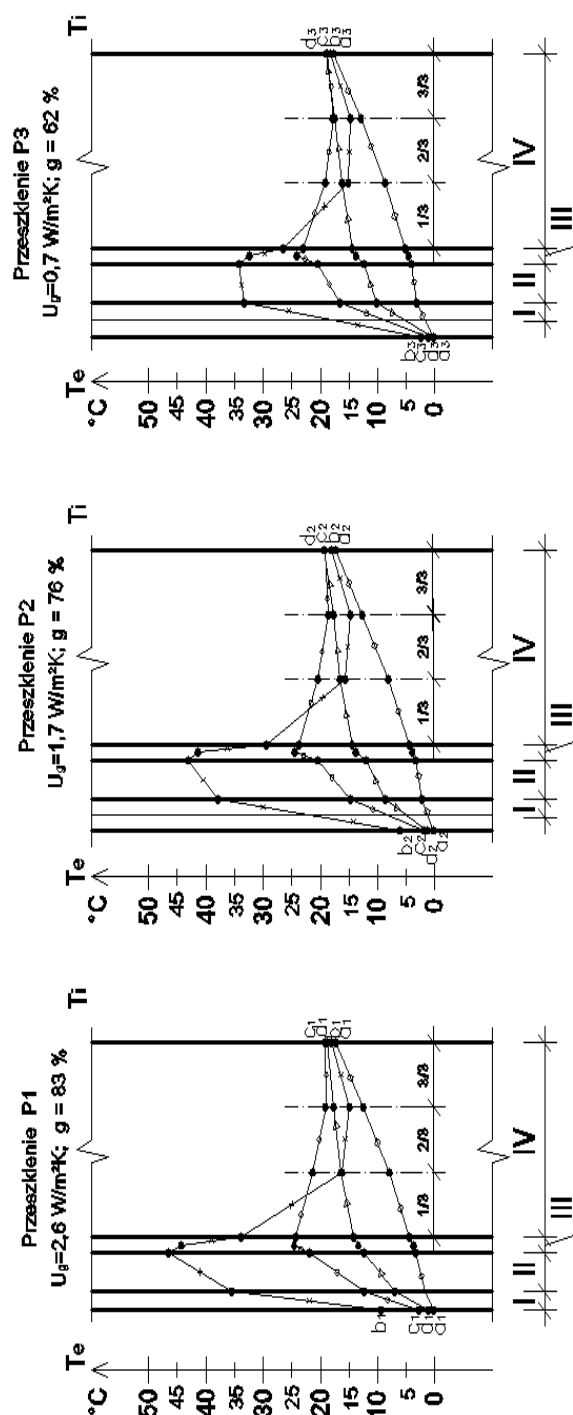
Schemat przegrody wraz z usytuowaniem czujników temperatury T_i oraz czujników gęstości strumienia ciepła q przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zmodyfikowana przegroda kolektorowo – akumulacyjna
Fig. 3. Modified thermal storage wall

3. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

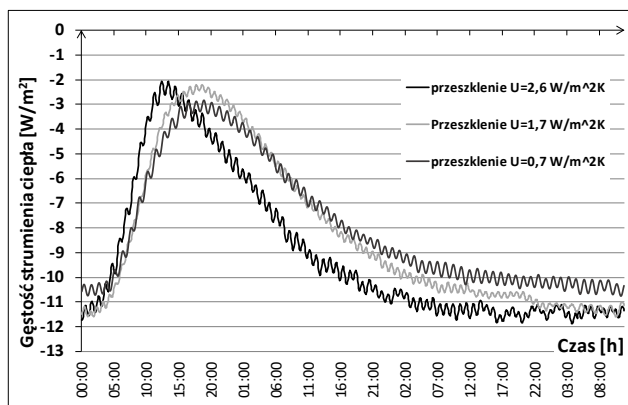
W analizowanej przegrodzie kolektorowo–akumulacyjnej rejestrowano temperatury (T_j) w charakterystycznych punktach pionowego przekroju poprzecznego oraz gęstości strumienia ciepła (q) na jej wewnętrznej powierzchni. Rozkłady temperatur w przegrodzie z trzema rodzajami przeszklenia dla czterech przedziałów pomiarowych: a – stan wyjściowy, b – stan po 6 godzinach, c – stan po 12 godzinach i d – stan po 24 godzinach, zostały przedstawione na rys.4. Przegroda P1 z przeszklaniem $U_{g1}=2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ osiągnęła najwyższą temperaturę absorbera po zakończeniu okresu nagrzewania $T_{b1}=46,7^\circ\text{C}$, podczas gdy przegroda P2 z przeszklaniem $U_{g2}=1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ temperaturę $T_{b2}=42,5^\circ\text{C}$ a kolejna P3 z przeszklaniem $U_{g3}=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ temperaturę $T_{b3}=33,2^\circ\text{C}$. Przegroda P1 najwyższą temperaturę absorbera uzyskuje dzięki najwyższej transmisyjności przeszklenia ($g_1=0,83\%$) co związane jest również z najwyższą wartością energii jaka jest dostarczona do absorbera. Przejście fali termicznej przez przegrodę w ciągu 24 godzin charakteryzuje wysoka dynamika zmiany temperatury w każdym z charakterystycznych przekrojów dla wszystkich przegród. Najwyższą dynamikę zmiany temperatur w charakterystycznych przekrojach obserwujemy w przegrodzie P1, najniższą dynamikę zaś charakteryzuje się przegroda P3 posiadająca przeszklenie o najwyższej izolacyjności.



Rys. 4. Rozkład temperatur w przegrodach z różnymi przeszkleniami. Warstwy przegrody: I – przeszklenie, II – pustka powietrzna, III – PCM, IV – pustak ceramiczny. Linie rozkładu temperatur: a, b, c, d – opis w tekście

Fig. 4. Distribution of temperatures in barriers with different glazing. Layers of barrier: I - glazing, II - air gap, III - PCM, IV - ceramic hollow. Temperature distribution lines: a, b, c, d - description in the text

Po upływie 12 godzin odnotowano najwyższe temperatury wewnątrz przegrody (w 1/3 i 2/3 grubości elementu ceramicznego) w każdej z nich. Wyjątek stanowi przegroda P3 w której najwyższą temperaturę w 2/3 grubości odnotowano po upływie 24 godzin. Najwyższą temperaturę na wewnętrznej powierzchni ściany po upływie 24 godzin odnotowano dla przegrody P3. Przegrody P2 i P3 po upływie 24 godzin na wewnętrznej powierzchni ściany posiadają wyższe temperatury niż przegroda P1, co oznacza ich niższe straty ciepła w porównaniu z P1. Przegroda P3 posiadająca przeszklenie o najwyższej izolacyjności, najwolniej nagrzewa się, posiada najdłuższy czas przechodzenia fali termicznej, co przekłada się na najwyższą efektywność cieplną (największą redukcję strat ciepła).



Rys. 5. Rozkład gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany

Fig. 5. Density distribution of heat flux on the inner surface of the wall

Rozkład gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany dla trzech kolejnych przeszkleń przedstawiono na rys.5. Przegroda z przeszklaniem P1 najszybciej osiąga maksymalną wartość gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni po ok. 13 godzinach, $q_1 = -2,0 \text{ W/m}^2$ z dynamiką maksymalnego przyrostu strumienia $\Delta q_1 = 9,5 \text{ W/m}^2$ oraz dobowym przyrostem strumienia $\Delta q_{1, \text{doba}} = 5,9 \text{ W/m}^2$. Kolejne przegrody w tym samym przekroju uzyskują niższe wartości gęstości strumienia ciepła w dłuższych okresach czasowych: przegroda P2 $q_2 = -2,2 \text{ W/m}^2$ po ok. 18 godzinach z dynamiką maksymalnego przyrostu strumienia $\Delta q_2 = 9,3 \text{ W/m}^2$ oraz dobowym przyrostem strumienia $\Delta q_{2, \text{doba}} = 8,1 \text{ W/m}^2$ a przegroda P3 $q_3 = -2,9 \text{ W/m}^2$ po ok. 18 godzinach z dynamiką maksymalnego przyrostu strumienia $\Delta q_3 = 7,6 \text{ W/m}^2$ oraz dobowym przyrostem strumienia $\Delta q_{3, \text{doba}} = 6,7 \text{ W/m}^2$. Przeszklenie o niskiej izolacyjności w przegrodzie P1 powoduje dość szybkie jej wychładzanie (najniżej położona linia na wykresie).

Po 24 godzinach od nagrzewania, gęstość strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany kształtują się

następująco: $q_2 = -3,3 \text{ W/m}^2$, $q_3 = -3,8 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -5,6 \text{ W/m}^2$. Uzyskane wartości wskazują na najszybsze wychładzanie przegrody P1. W kolejnej, drugiej dobie proces chłodzenia pogłębia się aby po 48 godzinach uzyskać następujące wartości gęstości strumienia ciepła: $q_3 = -9,0 \text{ W/m}^2$, $q_2 = -9,7 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -10,8 \text{ W/m}^2$. W kolejnej, trzeciej dobie proces chłodzenia znacznie słabnie przechodząc w okres stabilizacji aby po 72 godzinach uzyskać następujące wartości gęstości strumienia ciepła: $q_3 = -10,3 \text{ W/m}^2$, $q_2 = -11,2 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -11,5 \text{ W/m}^2$. W kolejnych 8 godzinach obserwujemy praktycznie stabilizację gęstości strumienia ciepła z minimalną tendencją spadkową dla przegrody P2 i P3.

Po 80 godzinach uzyskano następujące wartości gęstości strumienia ciepła: $q_3 = -10,5 \text{ W/m}^2$, $q_2 = -11,4 \text{ W/m}^2$ i $q_1 = -11,5 \text{ W/m}^2$, wracając zarazem do stanu wyjściowego (przed rozpoczęciem badania).

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników można stwierdzić, że dwa podstawowe parametry przeszklania: izolacyjność cieplna i przepuszczalności energii promieniowania słonecznego są bardzo istotne w funkcjonowaniu przegrody kolektorowo – akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmiennie – fazowym. Istnieje możliwość znacznego zmniejszenia strat ciepła przez przegrodę, jeżeli oba te parametry (U_g i g) zostaną optymalnie dobrane.

Badania zostały wykonane dla jednego cyklu nagrzewania, (jeden dzień słoneczny), po którym następuje kilka dób wychładzania przegrody (dni pochmurne). Z przeprowadzonych badań wynika, że po dwóch kolejnych dniach pochmurnych przegrody rozpoczynająby pracę praktycznie od początku (powracały do stanu wyjściowego). Uzyskane wyniki wskazują, że badane przegrody uzyskałyby dodatni strumień ciepła (płynący do wnętrza pomieszczenia) po co najmniej dwóch kolejnych cyklach nagrzewania.

Uzyskane wyniki sugerują również, że najefektywniejsze przeszklenie może posiadać przegroda P2.

Należy zaznaczyć, że w badaniach zastosowano przeszklenie o najwyższej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego dla danej izolacyjności cieplnej.

Aby uzyskać szerszą udokumentowaną wiedzę w zakresie funkcjonowania przegrody kolektorowo – akumulacyjnej modyfikowanej materiałem zmiennie – fazowym w różnych cyklach nagrzewania i chłodzenia istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych długoterminowych badań. Badania w tym zakresie będą kontynuowane, również przy zmiennych parametrach materiału ściennego modyfikowanego PCM, przeszklania oraz temperatury w komorze zimnej pod kątem określenia ich wpływu na efektywność cieplną przegrody.

INFLUENCE OF CONFIGURATION SOLUTIONS OF GLAZING LAYER FOR ENERGETIC FUNCTIONING OF MODIFIED THERMAL STORAGE WALL

Summary: During designing and construction of the buildings, important matters are energy-saving issues related to the operational functioning of these buildings. The favorable energy characteristics of buildings can be achieved through various methods, based on the scientific issues of building physics. The future direction is the use of renewable energy sources to improve the heat balance of buildings with functional uses. Among the various technological solutions of external walls, the thermal storage wall is an interesting proposition of the southern, facade structures of buildings. The purpose of the considerations presented in this article is to determine the effect of glazing parameters on the thermal performance of the thermal storage wall containing phase change material. Glazing with different values of heat transfer coefficients and total transmittance of sunlight were used in the study. The graphical interpretation of the obtained results of studies of the behavior of the thermal storage wall modified by phase change material and by three types of glazing was presented. Based on the results of the research, conclusions were presented concerning the purpose of applying specific structural and material solutions of building envelopes in the climatic conditions of Poland.

Keywords: glazing, thermal storage wall, phase change material, experimental research

Literatura

- [1] Wieprzkowicz A., Heim D.: Współczynnik tłumienia amplitudy wahań temperatury izolacji termicznej modyfikowanej materiałem fazowo zmiennym. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXIV, z. 64 (2/II/17), kwiecień-czerwiec 2017, s. 17-24
- [2] Chwieduk D. A.: Wybrane przykłady zastosowania materiałów PCM w budownictwie. *Czasopismo Inżynierii*

Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 29-38

[3] Sun D., Wang L.: Research on heat transfer performance of passive solar collector-storage wall system with phase change materials, *Energy and Buildings* 119 (2016) 183–188

[4] Chwieduk D., A.: Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries, *Energy* Volume 59, 15 September 2013, Pages 301–313

[5] Álvarez S., Cabeza L., F, Ruiz-Pardo A., Castell A., José Antonio Tenorio J., A.: Building integration of PCM for natural cooling of buildings, *Applied Energy* Volume 109, September 2013, Pages 514–522

[6] Lichołai L., Krasoń J., Miąsik P., Starakiewicz A.: Udział materiału zmienno – fazowego w pracy energetycznej przegrody kolektorowo – akumulacyjnej w przejściowych warunkach klimatycznych, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXIV, z. 64 (1/17), styczeń-marzec 2017, s. 495-504