

TERMODYNAMIKA STRUKTURALNEGO ZASOBNIKA CIEPŁA Z PEŁNYM PRZEBIEGIEM PRZEMIANY FAZOWEJ ZŁOŻA PCM W FAZACH ŁADOWANIA I ROZŁADOWANIA W CYKLU DOBOWYM

Wojciech DZIENISZEWSKI, Ryszard WNUK

*Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Zakład Problemów Eko-Budownictwa
ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa
e-mail: wdenis@ippt.gov.pl; rwnuk@ippt.gov.pl*

Streszczenie: Przedstawiono sformułowanie i ogólne rozwiązanie zagadnienia akumulacji i wymiany ciepła pozyskiwanego z promieniowania słonecznego, w płaskim strukturalnym zasobniku z wypełnieniem materiałem fazowo-zmiennym w stałej temperaturze. Wobec założenia możliwości istnienia w zasobniku dodatkowych wspomagających konwencjonalnych źródeł ciepła przyjęto, że w czasie jego funkcjonowania zachodzi pełny przebieg procesów przemiany fazowej złoża, zarówno w fazach ładowania i rozładowania energii cieplnej odpowiednio w porach dziennej i nocnej w cyklu dobowym. Sformułowano równania energii wewnętrznej i temperatury magazynu, określono dobowy przebieg jego temperatury i zrównoważone w cyklu dobowym ilości magazynowanego ciepła, pozyskiwanego i oddawanego otoczeniu. Przypadek funkcjonowania zasobnika, bez udziału dodatkowych źródeł ciepła, zilustrowano przykładem funkcjonowania zasobnika z wypełnieniem parafiną RT 26.

Słowa kluczowe: zasobnik (magazyn) i magazynowanie ciepła [4], energia wewnętrzna zasobnika, materiał fazowo-zmienny (Phase Change Material – PCM) [2], równania bilansu energii wewnętrznej i temperatury.

1. OPIS ZASOBNIKA I WARUNKÓW JEGO FUNKCJONOWANIA

Zasobnik ma kształt płyty o powierzchni czołowej A_a , grubości d_a i objętości $V_a = d_a A_a$, zintegrowanej z przegrodą wewnętrzną pomieszczenia. Jest izolowany na powierzchni bocznej płyty i na powierzchni styku z przegrodą. Wymiana ciepła pomiędzy zasobnikiem a powietrzem wewnętrznym pomieszczenia zachodzi przez powierzchnię czołową jego płyty. Umieszczony płytą czołową na wprost przegrody południowej o powierzchni przeszklenia A_c , ze współczynnikiem α przepuszczalności promieniowania, umożliwia bezpośrednio pozyskanie

energii promieniowania słonecznego do magazynowania. Zasobnik ma wewnętrzną budowę strukturalną złożoną z osnowy np. z betonu i wkładek wypełnionych materiałem PCM. Są one rozmieszczone w płycie w sposób regularny w stopniu wypełnienia określonym współczynnikiem φ . Własności termofizyczne materiału osnowy charakteryzują: gęstość ρ_o , ciepło właściwe c_o oraz przewodność cieplna λ_o . Natomiast charakterystyki materiałów PCM opisują: ciepło właściwe c_{fs} , c_{fc} różne w stanach stałym i ciekłym, ciepło przemiany fazowej (ciepło utajone) o gęstości C_{PCM} [J/kg], związane z pochłanianiem ciepła w procesie topnienia lub jego oddawaniem otoczeniu w procesie krzepnięcia materiału, gęstość ρ_{PCM} oraz przewodność cieplna λ_{PCM} . Pojemność cieplną zasobnika w różnych stanach przemiany fazowej materiału PCM określają wzory:

$$\begin{aligned} C_{fs} &= V_a [\rho_o (1 - \varphi) c_o + \rho_{PCM} \varphi c_{fs}] \\ C_{fc} &= V_a [\rho_o (1 - \varphi) c_o + \rho_{PCM} \varphi c_{fc}]. \end{aligned} \quad (1)$$

Zasobnik funkcjonuje w ciągu doby odniesionej do określonego dnia miesiąca roku. Przyjęto podział doby na czas $t^d[0, t^D]$ pory dziennej, w której występuje napromieniowanie słoneczne oraz na czas $t^n[0, t^N]$ pory nocnej przy braku bezpośredniego tego oddziaływania. Czas trwania pory dziennej i pory nocnej w rozpatrywanej dobie określają odpowiednio symbole t^D , t^N . Jest umieszczony w pomieszczeniu o stałej temperaturze wewnętrznej w porach: dziennej T_i^d , nocnej T_i^n . Powierzchnia czołowa płyty zasobnika o współczynniku pochłaniania promieniowania słonecznego α jest eksponowana na działania całkowitego promieniowania słonecznego o średniej gęstości energii J_s [J/m²], padającego na powierzchnię A_c oszklenia przegrody o średnim współczynniku przepusz-

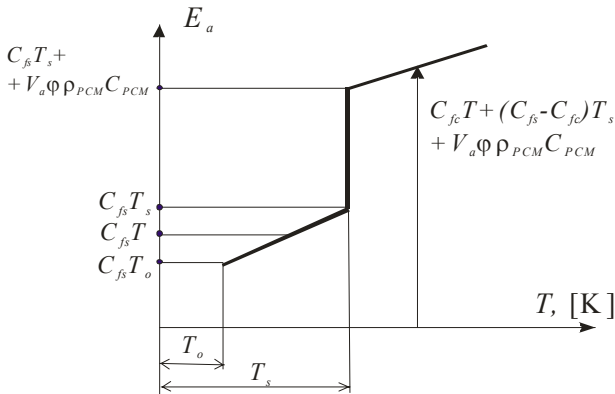
czalności κ . Jest ona poddana w porze dziennej napromieniowaniu o gęstości $\bar{J}_a = J_s \alpha \kappa$.

W celu zapewnienia pełnego przebiegu procesów przemiany fazowej materiału PCM w porach dziennej i nocnej, niezależnie od wielkości pozyskanej energii promieniowania słonecznego przyjęto że, zasobnik ciepła może być dodatkowo wspomagany przez urządzenia konwencjonalne, wewnętrznym źródłem ciepła (lub chłodu) odpowiednio o gęstościach objętościowych q_a^d w porze dziennej oraz q_a^n w porze nocnej.

W procesie funkcjonowania zasobnika, wskutek działania zmiennych w czasie bodźców termicznych, jest gromadzona w jego elementach energia wewnętrzna E_a , której równanie wyrażające zależność od jego temperatury T_a ma postać:

$$E_a = C_{fs} T_a [1 - H(T_a - T_s)] + [C_{fc} T_a + (C_{fs} - C_{fc}) T_s + V_a \rho_{PCM} \rho_{PCM} C_{PCM}] H(T_a - T_s) \quad (2)$$

po wprowadzeniu funkcji obszarowej $H(T_a - T_s)$ Heaviside'a. Wykres ilustrujący zależność energii wewnętrznej zasobnika od jego temperatury przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wykres zależności energii wewnętrznej zasobnika od jego temperatury T w procesie przemiany fazowej w stałej temperaturze T_s .

Fig. 1. Energy stored versus storage unit temperature for PCM of constant phase change temperature T_s .

2. OPIS ZASOBNIKA I WARUNKÓW JEGO FUNKCJONOWANIA

W odniesieniu do elementu o kształcie płyty, którą stanowi rozważany zasobnik ciepła, o grubości d_a izolowany na tylnej powierzchni, można przyjąć, że jeżeli jest spełnione kryterium małej liczby Biota ($Bi = \frac{d_a}{R_{ai} \lambda} \leq 0,15$), to

rozkład temperatury w obszarze ciała jest prawie równomierny i nie różni się więcej niż o 5% od temperatury

powierzchni [3]. W tym przypadku rozważanie ciała jako o skupionych charakterystykach jest uzasadnione.

Działanie całkowitego promieniowania słonecznego o gęstości \bar{J}_a oraz działające odpowiednio w porach dziennej i nocnej $p = d, n$ dodatkowe wewnętrzne źródła ciepła o gęstościach q_a^p , ciepło w ilościach $A_a / R_{ai} (T_a^p - T_i^p)$, odprowadzane z zasobnika o temperaturze T_a^p do powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu z oporem wymiany R_{ai} , wywołują odpowiednio w czasie dt^p przy $p = d, n$ zmiany energii wewnętrznej:

$$dE_a^d = \left(\frac{\bar{J}_a}{t^D} A_c + q_a^d V_a - \frac{A_a}{R_{ai}} (T_a^d - T_i^d) \right) dt^d \quad (3)$$

$$dE_a^n = \left(q_a^n V_a - \frac{A_a}{R_{ai}} (T_a^n - T_i^n) \right) dt^n,$$

które wyrażono w równoważnej postaci:

$$dE_a^p = \frac{A_a}{R_{ai}} T_i^p (\nu^p + 1 - T_a^p / T_i^p) dt^p \quad (4)$$

po wprowadzeniu współczynników bezwymiarowych

$$\nu^d = \frac{R_{ai}}{A_a} \left(\frac{\bar{J}_a}{t^D} A_c + q_a^d V_a \right) \frac{1}{T_i^d} \quad (5)$$

$$\nu^n = \frac{R_{ai}}{A_a} q_a^n V_a \frac{1}{T_i^n}$$

określających oddziaływanie bodźców cieplnych na zasobnik w porach dziennej i nocnej.

Ilości ciepła nagromadzonego w zasobniku w dowolnej chwili czasowej funkcjonowania systemu w porach dziennej i nocnej $p = d, n$ wyrażono odpowiednio przez całki oznaczone:

$$Q_a^p = \int_0^{t^p} dE_a^p = \frac{A_a}{R_{ai}} \left[T_i^p t^p (\nu^p + 1) - \int_0^{t^p} T_a^p dt \right] \quad (6)$$

przyrostów energii wewnętrznej E_a^p określonych na podstawie wzoru (4).

3. RÓWNANIE TEMPERATURY ZASOBNIKA I JEJ PRZEBIEG DOBOWY

Temperaturę zasobnika, zmienną w procesie ładowania w porze dziennej oraz w procesie rozładowania ciepła w porze nocnej, określono na podstawie równań (4) uwzględniając wyrażenia (2) na energię wewnętrzną. Po wprowadzeniu następujących symboli na stałe czasowe zasobnika odpowiednio w stanach skupienia stałym,

i płynnym materiału PCM w procesie przemiany fazowej:

$$\tau_{fs} = \frac{R_{ai}}{A_a} C_s, \quad \tau_{fc} = \frac{R_{ai}}{A_a} C_{fc} \quad (7)$$

oraz oznaczenia na czas trwania przemiany fazowej

$$\Delta t_f^p = \frac{R_{ai}}{[T_i^p(\nu^p + 1) - T_s] A_a} V_a \varphi \rho_{PCM} C_{PCM}, \quad (8)$$

otrzymano równania różniczkowe opisujące temperaturę zasobnika w porach $p = d, n$ dziennej i nocnej określonej doby:

$$\begin{aligned} & \left\{ \tau_{fs} [1 - H(T_a^p - T_s)] + \tau_{fc} H(T_a^p - T_s) + \right. \\ & \left. + \Delta t_f^p [T_i^p(\nu^p + 1) - T_s] \delta(T_a^p - T_s) \right\} \frac{dT_a^p}{dt^p} = \quad (9) \\ & = T_i^p (\nu^p + 1 - T_a^p / T_i^p) \end{aligned}$$

gdzie $\delta(T_a^p - T_s)$ jest funkcją Diraca.

Rozwiązując równania (9) w odniesieniu do pór $p = d, n$ dziennej i nocnej, przy warunkach początkowych:

$|T_a^d|_{t^d=0} = T_o^d, |T_a^n|_{t^n=0} = T_o^n$, a następnie wprowadzając do rozwiązań zmienne bezwymiarowe $\xi_o^p = T_o^p / T_i^p - 1 - \nu^p$ związane przy $p = d, n$ z wielkościami początkowymi T_o^d, T_o^n temperatury zasobnika oraz zmienne bezwymiarowe $\xi_s^p = T_s / T_i^p - 1 - \nu^p, \xi_c^p = T_c / T_i^p - 1 - \nu^p$ związane z temperaturą T_s przemiany fazowej, otrzymano wyrażenia opisujące funkcje temperatury zasobnika względem czasu

$$\begin{aligned} T_a^d(t^d) &= T_i^d \left\{ \left[(1 + \nu^d) + \xi_o^d \exp\left(-\frac{t^d}{\tau_{fs}}\right) \right] [1 - H(t^d - t_s^d)] + \right. \\ & \left. + \frac{T_s}{T_i^d} [H(t^d - t_s^d) - H(t^d - t_s^d - \Delta t_f^d)] + \right. \\ & \left. + \left[(1 + \nu^d) + \xi_s^d \exp\left(\frac{t_s^d + \Delta t_f^d - t^d}{\tau_{fc}}\right) \right] H(t^d - t_s^d - \Delta t_f^d) \right\} \\ T_a^n(t^n) &= T_i^n \left\{ \left[(1 + \nu^n) + \xi_o^n \exp\left(-\frac{t^n}{\tau_{fc}}\right) \right] [1 - H(t^n - t_s^n)] + \right. \\ & \left. + \frac{T_s}{T_i^n} [H(t^n - t_s^n) - H(t^n - t_s^n - \Delta t_f^n)] + \right. \\ & \left. + \left[(1 + \nu^n) + \xi_s^n \exp\left(\frac{t_s^n + \Delta t_f^n - t^n}{\tau_{fs}}\right) \right] H(t^n - t_s^n - \Delta t_f^n) \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

w których występujące symbole

$$t_s^d = \tau_{fs} \ln \frac{\xi_o^d}{\xi_s^d}, \quad t_s^n = \tau_{fc} \ln \frac{\xi_o^n}{\xi_s^n}$$

$$t_s^d + \Delta t_f^d = t_s^d - \frac{R_{ai}}{\xi_s^d T_i^d A_a} V_a \varphi \rho_{PCM} C_{PCM} \quad (11)$$

$$t_s^n + \Delta t_f^n = t_s^n + \frac{R_{ai}}{\xi_s^n T_i^n A_a} V_a \varphi \rho_{PCM} C_{PCM}$$

określają czas początku i końca przemiany fazowej w porach dziennej i nocnej.

4. WARUNKI SAMOCZYNNEGO FUNKCJONOWANIA W CYKLU DOBOWYM NASŁONECZNIONEGO ZASOBNIKA

Podstawienie do warunku ciągłości temperatury przejścia z pory dziennej do pory nocnej

$$|T_a^d|_{t^d=t^D} = |T_a^n|_{t^n=0}$$

i warunku funkcjonowania zasobnika w cyklu dobowym

$$|T_a^d|_{t^d=0} = |T_a^n|_{t^n=t^N}$$

odpowiednio wyrażen uzyskanych na podstawie równań (10) przebiegu w ciągu doby temperatury zasobnika, daje po uwzględnieniu wzorów (11) na chwile początku t_s^d, t_s^n przemiany fazowej w porach dziennej i nocnej układ równań przestępnych względem współczynników ξ_o^d, ξ_o^n

$$\begin{aligned} \xi_o^d &= -1 - \nu^d + \\ & + \frac{T_i^n}{T_i^d} \{1 + \nu^n + \xi_s^n (\xi_o^n / \xi_s^n)^{\tau_{fc}/\tau_{fs}} \exp[(\Delta t_f^n - t^N) / \tau_{fs}]\} \quad (12) \\ \xi_o^n &= -1 - \nu^n + \\ & + \frac{T_i^d}{T_i^n} \{1 + \nu^d + \xi_s^d (\xi_o^d / \xi_s^d)^{\tau_{fs}/\tau_{fc}} \exp[(\Delta t_s^n - t^D) / \tau_{fc}]\}, \end{aligned}$$

który z warunkami pełnego przebiegu procesu przemiany fazowej materiału PCM zasobnika

$$t_s^d + \Delta t_f^d = \tau_{fs} \ln \frac{\xi_o^d}{\xi_s^d} - \frac{R_{ai}}{\xi_s^d T_i^d A_a} V_a \varphi \rho_{PCM} C_{PCM} \leq t^D \quad (13)$$

$$t_s^n + \Delta t_f^n = \tau_{fc} \ln \frac{\xi_o^n}{\xi_s^n} + \frac{R_{ai}}{\xi_s^n T_i^n A_a} V_a \varphi \rho_{PCM} C_{PCM} \leq t^N$$

stanowią podstawę określenia współczynników ξ_o^d, ξ_o^n funkcjonowania zasobnika ciepła. W przypadku pojemności cieplnych $C_{fs} = C_{fc} = C$ zasobnika zachodzą równości

stałych czasowych $\tau_{fs} = \tau_{fc} = \tau = CR_{ai} / A_a$, równania (13) stają się liniowymi względem współczynników

$$\begin{aligned} \xi_o^d &= \\ &= \left[\frac{T_i^n}{T_i^d} (1 + \nu^n) - 1 - \nu^d \right] \frac{1 - \exp[(\Delta t_f^n - t^N) / \tau]}{1 - \exp[(\Delta t_f^d + \Delta t_f^n - t^D - t^N) / \tau]} \quad (14) \\ \xi_o^n &= \\ &= \left[\frac{T_i^d}{T_i^n} (1 + \nu^d) - 1 - \nu^n \right] \frac{1 - \exp[(\Delta t_f^d - t^D) / \tau]}{1 - \exp[(\Delta t_f^d + \Delta t_f^n - t^D - t^N) / \tau]} \end{aligned}$$

Przyjmując temperaturę początkową zasobnika $T_o^d = T_i^d$ równą stałej temperaturze T_i^d powietrza wewnętrznego w porze dziennej, wobec $\xi_o^d = -\nu^d$ równania (14) oraz nierówności (13) przybierają odpowiednio postać:

$$\begin{aligned} \nu^d \{1 - \exp[(\Delta t^d - t^D) / \tau]\} &= \\ &= \left[\frac{T_i^n}{T_i^d} (1 + \nu^n) - 1 \right] \{1 - \exp[(t^N - \Delta t_f^n) / \tau]\} \quad (15) \\ \xi_o^n &= \left(\frac{T_i^d}{T_i^n} - 1 - \nu^n \right) \exp[(t^N - \Delta t_f^n) / \tau] \\ \tau \ln \left(-\frac{\nu^d}{T_s / T_i - 1 - \nu^d} \right) + \Delta t_f^d &\leq t^D \\ \tau \ln \left[\frac{(T_i^d / T_i^n - 1 - \nu^n)}{(T_s / T_i^n - 1 - \nu^n)} \exp[(t^N - \Delta t_f^n) / \tau] \right] + \Delta t_f^n &\leq t^N \end{aligned}$$

Warunki znikania, wspomagających proces pełnego przebiegu przemiany fazowej w cyklu dobowym funkcjonowania zasobnika, wewnętrznych źródeł ciepła $q_a^p = 0$, przy $p = d, n$, określają znaczenia współczynników

$$\nu^d = R_{ai} \frac{A_c}{A_a} \frac{\bar{J}_a}{t^D T_i^d}, \quad \nu^n = 0 \quad (16)$$

i prowadzą do zagadnienia odwrotnego na określenie stosunku T_i^n / T_i^d temperatury wewnętrznej w porach dziennej i nocnej na podstawie równań (15)₁₋₂ przy nierównościach (15)₃₋₄.

5. CIEPŁO AKUMULOWANE W ZASOBNIKU

Ilości ciepła nagromadzonego w zasobniku w dowolnej chwili czasowej pory dziennej i pory nocnej funkcjonowania systemu wyrażono odpowiednio przez całki oznaczone:

$$\begin{aligned} Q_a^d &= \int_0^{t^d} dE_a^d = \int_0^{t^d} \frac{dE_a^d}{dt} dt \quad (17) \\ Q_a^n &= \int_0^{t^n} dE_a^n = \int_0^{t^n} \frac{dE_a^n}{dt} dt \end{aligned}$$

z przyrostów energii wewnętrznej E_a^d, E_a^n w porach dziennej i nocnej.

Uwzględniając określenia (15) na bezwymiarowe współczynniki ν^d, ν^n , przedstawiono wyrażenia

$$\begin{aligned} Q_a^d &= \frac{A_a}{R_{ai}} T_i^d \nu^d t^d - Q_{ai}^d \quad (18) \\ Q_a^n &= \frac{A_a}{R_{ai}} T_i^n \nu^n t^n - Q_{ai}^n \end{aligned}$$

na ilości akumulowanego ciepła w zasobniku w porze dziennej i upust w porze nocnej jego funkcjonowania odpowiednio w przedziałach czasu $t^d [0, t^D], t^n [0, t^N]$.

Występujące we wzorach jw. symbole:

$$\begin{aligned} Q_{ai}^d &= \frac{A_a}{R_{ai}} \left(\int_0^{t^d} T_a^d dt - T_i^d t^d \right) \quad (19) \\ Q_{ai}^n &= \frac{A_a}{R_{ai}} \left(\int_0^{t^n} T_a^n dt - T_i^n t^n \right) \end{aligned}$$

oznaczają ilości ciepła przekazywane do otoczenia w dowolnej chwili czasowej odpowiednio w porze dziennej i nocnej. Natomiast równoważne ilości ciepła magazynowanego i oddawanego w ciągu doby są określone wzorami:

$$\begin{aligned} Q_a^D &= T_i \frac{A_a}{R_{ai}} \left\{ \tau_{fs} (\xi_s^d - \xi_o^d) + \tau_{fc} (\xi_o^n - \xi_s^n) - \xi_s^d \Delta t_f^d \right\} \quad (20) \\ Q_a^N &= T_i \frac{A_a}{R_{ai}} \left\{ \tau_{fs} (-\xi_s^d + \xi_o^d) + \tau_{fc} (\xi_s^n - \xi_o^n) - \xi_s^n \Delta t_f^n \right\} \end{aligned}$$

6. PRZYKŁAD ZASOBNIKA W POSTACI WARSZTYWY KOMPOZYTOWEJ POZYSKUJĄCEJ CIEPŁO Z PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

6.1. Dane wyjściowe

Charakterystyki termofizyczne materiałów zasobnika:

- osnowa zasobnika z betonu: $c_o = 1130 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,
- $\rho_o = 1600 \text{ kg}/\text{m}^3$;

- materiał PCM wypełnienia parafina RT 26 (przyjęty na podstawie [1]): $c = c_{fs} = c_{fc} = 2500 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,
 $C_{PCM} = 172000 \text{ J}/\text{kg}$, temperatura początku (topnienia) i końca (krzepnięcia) $T_s = 295 \text{ K}$,
 $\rho_{PCM} = 880 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- przewodność cieplna betonowej osnowy $\lambda_o = 1,105 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, materiału PCM $\lambda_{PCM} = 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Charakterystyki strukturalne i termofizyczne zasobnika:

- grubość płyty zasobnika $d_a = \frac{V_a}{A_a} = 0,007 \text{ m}$, objętość $V_a = 0,07 \text{ m}^3$, powierzchnia $A_a = 10 \text{ m}^2$;
- procentowe objętościowe wypełnienie $\varphi = 0,785$ zasobnika materiałem PCM parafiny;
- opór przejmowania ciepła pomiędzy zasobnikiem i otoczeniem $R_{ai} = 0,12 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$;
- wartość liczby Biota, przy zastępczej przewodności cieplnej materiału zasobnika $\lambda = \lambda_{PCM} \cdot \varphi + \lambda_o \cdot (1 - \varphi) = 0,2 \cdot 0,785 + 1,105 \cdot 0,215 = 0,395 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,
 wynosi $Bi = \frac{d_a}{R_{ai} \lambda} = \frac{0,007}{0,12 \cdot 0,395} = 0,15$, co stanowi wartość graniczną;
- pojemności cieplne zasobnika odniesione do powierzchni A_a w stanach stałym i ciekłym parafiny:
 $\frac{C_f}{A_a} = 0,007 [1600 \cdot (1 - 0,785) \cdot 1130 + 880 \cdot 0,785 \cdot 2500] = 14810,04 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$;
- stała czasowa zasobnika w stanach stałym i ciekłym przemiany fazowej materiału PCM:
 $\tau = 0,12 \cdot 14810 = 1777,28 \text{ s}$

Charakterystyki otoczenia i środowiska:

- temperatura powietrza wewnętrznego w porze dziennej $T_i^d = 293 \text{ K}$;
- stosunek liczbowy $T_s / T_i^d = 295/293 = 1,00683$;
- czas trwania pór dziennej i nocnej $t^D = t^N = 12 \cdot 3600 = 43200 \text{ s}$;
- napromieniowanie powierzchni pionowej $J_s = 4,548 \cdot 10^6 \text{ J}/\text{m}^2$;
- napromieniowanie zasobnika $\bar{J}_a = J_s \alpha_K = 4,548 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 0,7225 = 1,643 \cdot 10^6 \text{ J}/\text{m}^2$;
- powierzchnia przeszklenia okna przegrody okna $A_c = 10 \text{ m}^2$.

6.2. Charakterystyki funkcjonowania zasobnika w cyklu dobowym

- Warunki znikania dodatkowych wspomagających źródeł ciepła

Uwzględniając po podstawieniu danych liczbowych wyrażenia (8) określające czas trwania przemiany fazowej parafiny w temperaturze $T_s = 295 \text{ K}$ w porach dziennej i nocnej funkcjonowania zasobnika

$$\Delta t_f^d = -\frac{0,12}{293 \cdot 10 \xi_s^d} \cdot 0,07 \cdot 0,785 \cdot 880 \cdot 172000 = -\frac{340,65111}{0,00683 - v^d}$$

$$\Delta t_f^n = \frac{0,12}{293 \cdot 10 \xi_s^n} \cdot 0,07 \cdot 0,785 \cdot 880 \cdot 172000 = \frac{340,65111}{T_s / T_i^n - 1 - v^n}$$

przedstawiono warunek ciągłości temperatury zasobnika przy przejściu z pory dziennej do pory nocnej w postaci przemiany fazowej parafiny, w dobowym cyklu funkcjonowaniu zasobnika

$$v^d \left\{ 1 - \exp \left[\left(-\frac{340,65111}{0,00683 - v^d} - 43200 \right) \cdot \frac{1}{1777,28} \right] \right\} = [1 - T_i^n / T_i^d (1 + v^n)] \left\{ \exp \left[\left(43200 - \frac{340,65111}{1,00683 T_i^d / T_i^n - v^n - 1} \right) \cdot \frac{1}{1777,28} \right] - 1 \right\}$$

gdzie zgodnie z (5)

$$v^d = \frac{0,12}{293 \cdot 10} \left(\frac{1,642965 \cdot 10^6}{43200} \cdot 10 + 0,07 q_a^d \right) = 0,01558 + 0,287 \cdot 10^{-5} q_a^d$$

$$v^n = 0,287 \cdot 10^{-5} q_a^n$$

Znikanie źródeł ciepła $q_a^d = q_a^n = 0$ implikuje znaczenia współczynników $v^d = 0,01558$, $v^n = 0$, stąd po uwzględnieniu tych znaczeń symboli, warunek ciągłości temperatury staje się równaniem względem stosunku temperatury wewnętrznej w porze dziennej i nocnej. Równanie to wobec $\left| F(T_i^n / T_i^d) \right|_{T_i^n / T_i^d = 0,9982} = 0,00001$ jest spełnione przy $T_i^n / T_i^d = 0,9982$ co daje $T_i^n = 292,46 \text{ K}$ i stanowi warunek znikania dodatkowych źródeł ciepła wspomagających funkcjonowanie zasobnika.

- czas trwania przemiany fazowej parafiny zasobnika w porach dziennej i nocnej
- Uwzględniając wartości liczbowe współczynników $v^d = 0,01558$, $v^n = 0$ i temperatury $T_i^n = 292,46 \text{ K}$ znajdujemy: $\xi_o^d = -0,01558$, $\xi_o^n = 0,01651$, $\xi_s^d = -0,00875$, $\xi_s^n = 0,00867$. Stąd chwile czasowe początku topnienia w porze dziennej i początku krzepnięcia w porze nocnej odpowiednio wynoszą:

$$t_s^d = 1777,28 \ln\left(\frac{0,01558}{0,00875}\right) = 1024 \text{ s},$$

$$t_s^n = 1777,28 \ln\left(\frac{0,01651}{0,00867}\right) = 1145 \text{ s},$$

natomiast czas trwania przemiany fazowej parafiny w temperaturze $T_s = 295 \text{ K}$ odpowiednio w porze dziennej i nocnej jest następujący

$$\Delta t_f^d = -\frac{340,65111}{0,00683 - 0,01558} = 38928 \text{ s},$$

$$\Delta t_f^n = \frac{340,65111}{1,00867 - 1} = 39380 \text{ s}$$

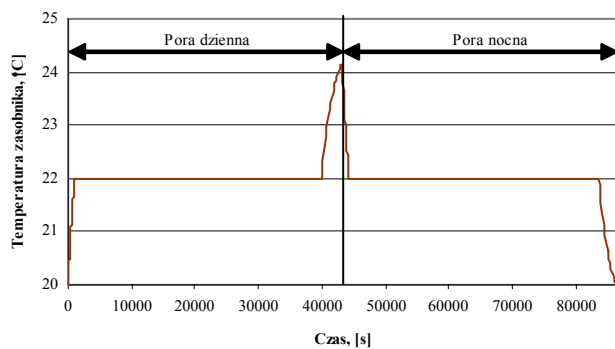
Warunki (13) pełnego przebiegu procesu są spełnione.

• Przebieg dobowy zmian temperatury zasobnika
Uwzględniając wskazane wartości liczbowe powyższych symboli przedstawiono funkcje temperatury zasobnika, odpowiednio w porze dziennej i nocnej w procesie pełnej

$$T_a^d = 293 \left\{ \left[1,01558 - 0,01558 \exp\left(-\frac{t^d}{1777,28}\right) \right] [1 - H(t^d - 1024)] + 1,00683 [H(t^d - 1024) - H(t^d - 39952)] + [1,01558 - 0,00875 \exp\left(\frac{39952 - t^d}{1777,28}\right)] H(t^d - 39952) \right\} \text{ K},$$

$$T_a^n = 292,46 \left\{ \left[1 + 0,01651 \exp\left(-\frac{t^n}{1777,28}\right) \right] [1 - H(t^n - 1145)] + 1,00867 [H(t^n - 1145) - H(t^n - 40437)] + [1 + 0,00867 \exp\left(\frac{40437 - t^n}{1777,28}\right)] H(t^n - 40437) \right\} \text{ K}$$

Funkcję temperatury zasobnika w porze dziennej i nocnej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zmiana temperatury zasobnika w ciągu doby.

Fig. 2. Daily temperature-time curve of PCM based storage unit.

- Energia zmagazynowana w porze dziennej i oddana otoczeniu w porze nocnej

Ilości akumulowanego ciepła Q_a^D w zasobniku w ciągu pory dziennej oraz ilości ciepła Q_a^N rozładowanego z zasobnika w ciągu pory nocnej, po uwzględnieniu danych liczbowych na podstawie (20) wynoszą:

$$\begin{aligned} Q_a^D &= -Q_a^N = \\ &= 293 \cdot \frac{10}{0,12} [1777,28 \cdot (-0,00875 - 0,01558) + \\ &+ 1777,28(0,01651 - 0,00867) + 0,00875 \cdot 38828] = \\ &= 8,954 \cdot 10^6 \text{ J}. \end{aligned}$$

7. ZAKOŃCZENIE

Opracowano model funkcjonowania magazynu ciepła z materiałem zmiennie-fazowym, stanowiącego element strukturalny przegrody budowlanej. Przedstawione rozwiązanie stanowić może podstawę projektowania i oceny przydatności zaproponowanego rozwiązania magazynu ciepła, w szczególności w odniesieniu do zastosowania w niskoenergetycznych budynkach.

THERMODYNAMICS AND DAILY THERMAL PERFORMANCE OF PCM BASED STORAGE UNIT

Summary: Integrated to internal wall PCM based storage unit absorbs solar radiation during daytime and releases the heat at night. The features of storage unit and its thermal characteristics are described. The basic conservation equations of energy for the day and night time are presented. Daily thermal performance is obtained from mathematical calculations for selected commercial PCM – RT 26.

Literatura

- [1] Hadorn J-C., (Ed). *Thermal energy storage for solar and low energy buildings*. State of art by the IEA Solar Heating and Cooling Task 32, June 2005
- [2] Mochnacki B., Suchy J.S. *Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów*. PWN, Warszawa 1993
- [3] Taler J., Duda P. *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003
- [4] Wnuk R. *Modelowanie i analiza procesów akumulacji ciepła z przemianą fazową złoża*. Praca doktorska, Warszawa 1999