

Zbysław Pluta, Ryszard Wnuk

Centrum Helio-Ekostruktur IPPT PAN

WPLYW MATERIAŁU PCM W ZBIORNIKU MAGAZYNUJĄCYM NA DZIAŁANIE SŁONECZNEJ INSTALACJI PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ

Efektywność działania słonecznej instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej (CWU) może być znacznie poprawiona przez umieszczenie w wodnym zbiorniku magazynującym elementów zawierających substancje ulegające przemianom fazowym (PCM). W prezentowanej pracy zaproponowano opis matematyczny instalacji CWU z dwoma mediami magazynującymi energię cieplną (wodą i PCM). Przedstawiono wyniki przeprowadzonej weryfikacji eksperymentalnej modelu matematycznego zbiornika dla kulistego złoża magazynującego wypełnionego stearyną. Zamieszczono wyniki przykładowych obliczeń symulacyjnych pracy instalacji dla polskich warunków klimatycznych wykazując istotny wpływ elementów z PCM na charakterystyki eksploatacyjne instalacji.

OZNACZENIA

- A – powierzchnia [m^2]
- F_R – współczynnik odprowadzenia ciepła z kolektora [-]
- c – ciepło właściwe [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
- G – gęstość strumienia promieniowania słonecznego [$W \cdot m^{-2}$]
- h – współczynnik przejmowania ciepła pomiędzy wodą a elementami wypełnionymi PCM [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
- k – przewodność cieplna [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- L – liczba sekcji zbiornika magazynującego [szt]
- m – wydatek masowy wody [$kg \cdot s^{-1}$]
- n – liczba elementów z PCM [szt]
- R – współczynnik przeliczeniowy promieniowania słonecznego z płaszczyzny poziomej na pochyloną [-]
- r – współrzędna promieniowa kulistego elementu z PCM [m]
- Q – strumień ciepła [$W \cdot m^{-2}$]
- U – współczynnik strat cieplnych [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
- T – temperatura wody w zbiorniku magazynującym [K]
- V – objętość wody [m^3]
- γ – współczynnik przyjmujący wartości 0 lub 1 zależnie od tego, czy istnieje przepływ w danej sekcji zbiornika magazynującego [-]

- ρ – gęstość [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 τ – czas [s]
($\tau \alpha$) – współczynnik transmisyjno-absorbcyjny kolektora promieniowania słonecznego [-]

Indeksy

- a* – otoczenie
b – promieniowanie bezpośrednie
c – kolektor
d – promieniowanie dyfuzyjne
f – ciecz
i – numeracja sekcji zbiornika akumulacyjnego
k – kula z materiałem PCM
m – materiał PCM
s – zbiornik magazynujący
w – powierzchnia elementu z PCM
o – odbiór ciepłej wody użytkowej

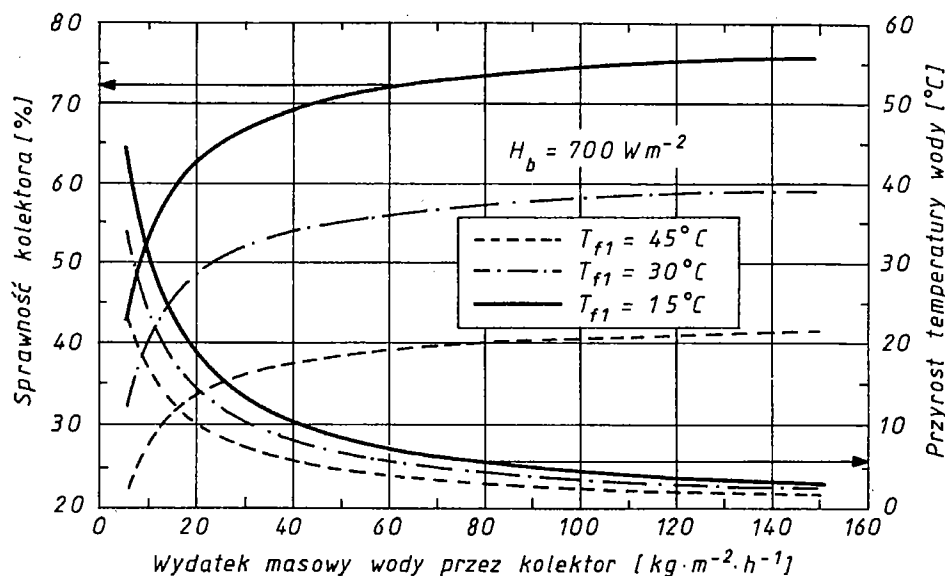
WSTĘP

Słoneczne instalacje przygotowania ciepłej wody użytkowej zastosowane w polskich warunkach klimatycznych mogą przynieść wymierne efekty ekonomiczne, nie wspominając już o znaczeniu ekologicznym takich rozwiązań. Przy eksploatacji tych instalacji w okresie sześciu miesięcy letnich mogą one pokryć do 90% całkowitego zapotrzebowania na ciepłą wodę do celów sanitarnych. Ilość pozyskiwanej energii promieniowania słonecznego zależy w dużym stopniu od rodzaju instalacji, jej parametrów technicznych i sposobu eksploatacji. Zwiększenie efektywności działania systemów pozyskiwania energii ze źródeł niekonwencjonalnych można obecnie osiągnąć dwiema drogami – poprzez wprowadzanie nowych, doskonalszych rozwiązań technicznych oraz poprzez optymalną eksploatację instalacji, zależną od jej konstrukcji i warunków klimatycznych. Omówione w niniejszej pracy rozwiązanie konstrukcyjne instalacji ze zbiornikiem akumulacyjnym z dwoma mediami magazynującymi łączy w sobie oba wymienione elementy. Umieszczenie w zbiorniku wodnym dodatkowego medium magazynującego ulegającego przemianom fazowym modyfikuje charakterystykę termiczną zbiornika zmieniając tym samym charakterystyki eksploatacyjne całej instalacji.

1. RÓŻNICE W KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI INSTALACJI TRADYCYJNEJ I PROPONOWANEJ

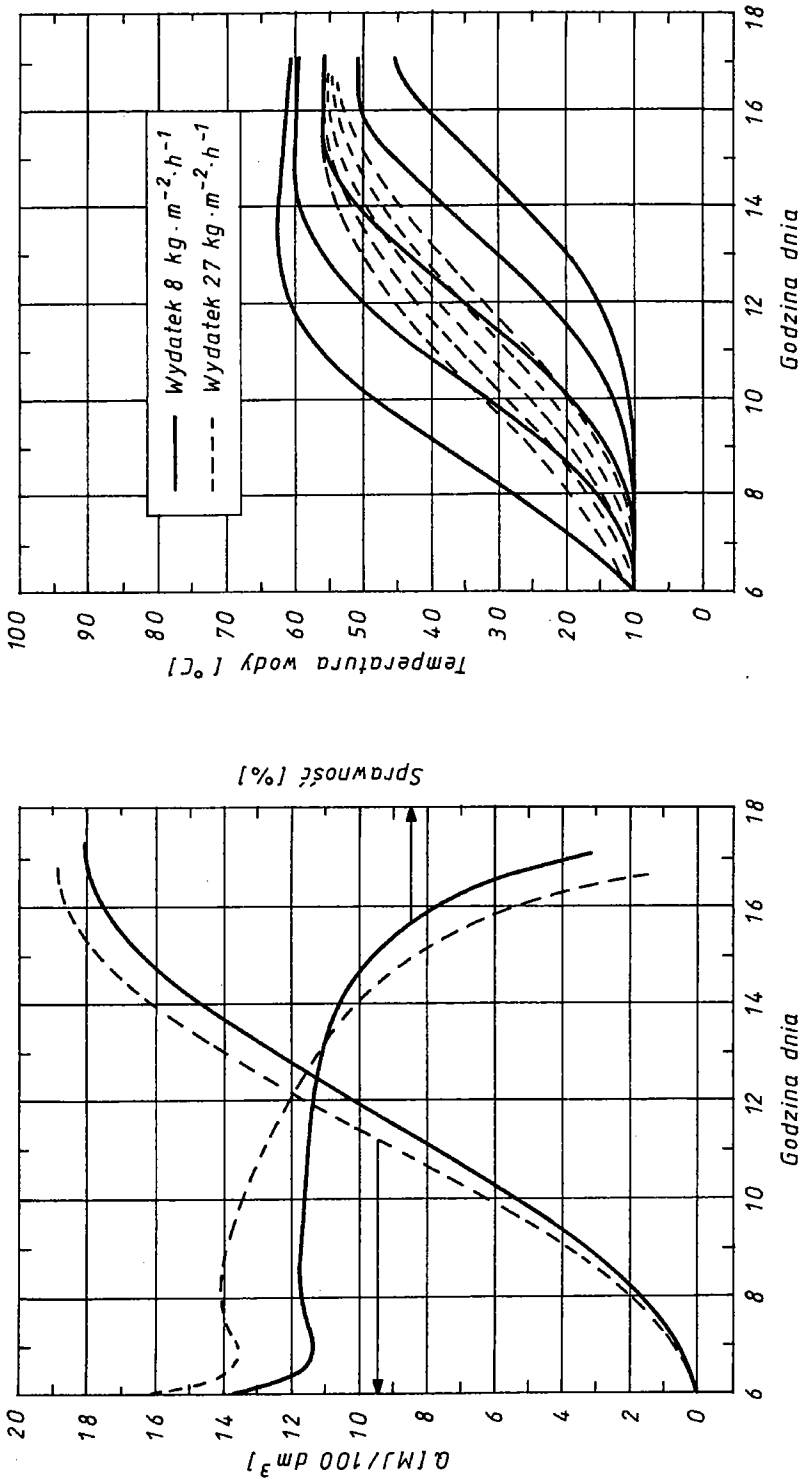
W klasycznych słonecznych instalacjach przygotowania CWU do magazynowania energii cieplnej uzyskanej z kolektorów słonecznych stosowany jest zbior-

nik wodny o objętości od 50 do 70 dm³ na 1 m² powierzchni kolektorów [1]. W zbiorniku tym może też być zainstalowany wymiennik ciepła oddzielający obieg kolektorowy od obiegu odbioru CWU, mający postać spiralnej wężownicy lub płaszcza. W górnej części zbiornika magazynującego znajduje się strefa, w której gromadzi się woda o najwyższej temperaturze pobierana przez użytkownika. W prawidłowo zaprojektowanej i eksploatowanej instalacji, w trakcie gromadzenia energii z kolektorów słonecznych, w zbiorniku magazynującym wytwarza się pionowy gradient temperatury, zależny od smukłości zbiornika (stosunku wysokości do średnicy), wydatku masowego wody w obiegu kolektorowym i oczywiście od ilości energii doprowadzanej i odprowadzanej ze zbiornika.

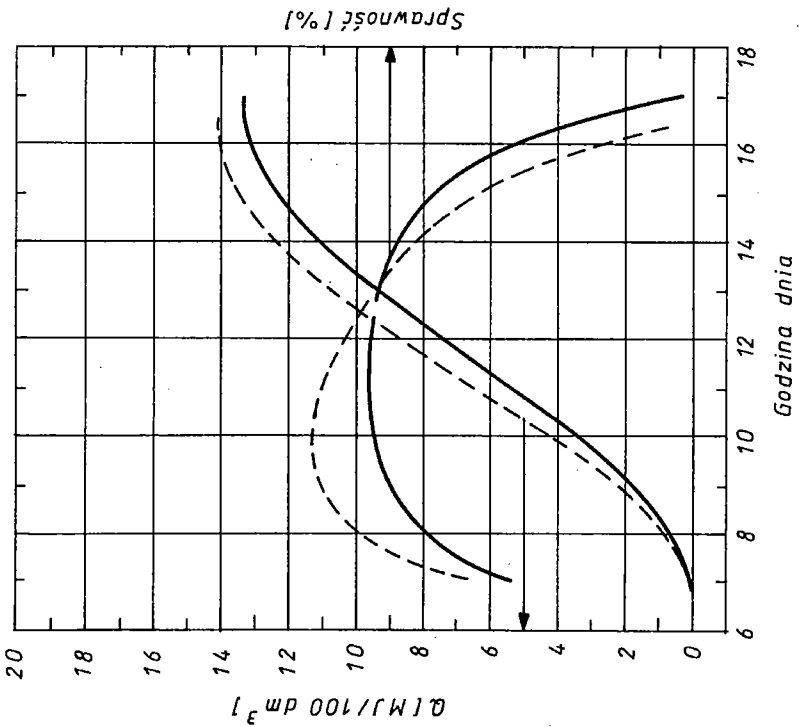
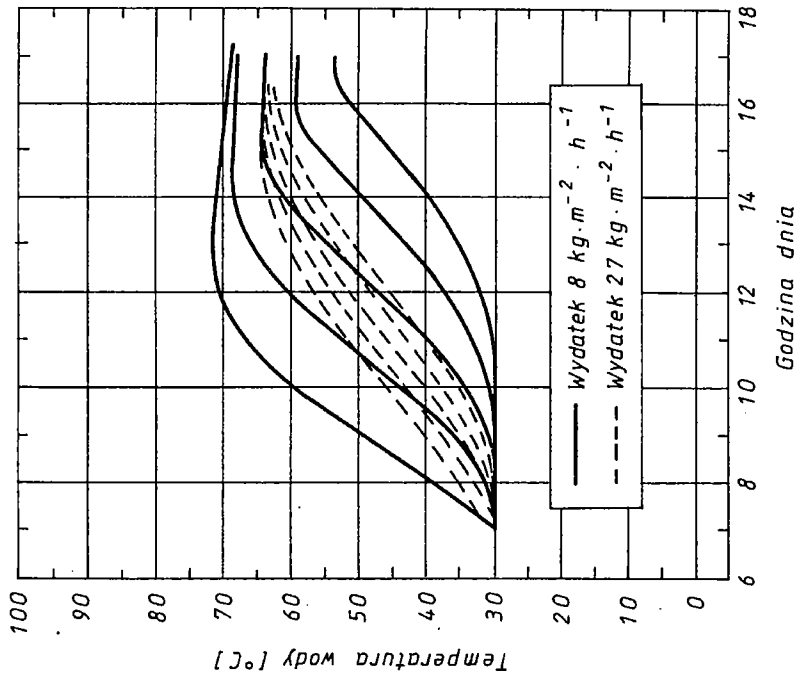


Rys. 1. Wpływ natężenia przepływu wody przez kolektor na jego sprawność chwilową dla różnych temperatur wody T_{f1} na wlocie do kolektora

Zjawisko stratyfikacji termicznej w zbiorniku akumulacyjnym, zwiększające sprawność kolektora słonecznego, jest korzystne również dla użytkownika ciepłej wody. Ma on wówczas do dyspozycji wodę o wyższej temperaturze przy tej samej ilości energii zmagazynowanej w zbiorniku. Uzyskanie silnej stratyfikacji w warunkach zmiennego w ciągu dnia nasłonecznienia (częste przesłanianie tarczy słonecznej przez przelotne zachmurzenie) wymaga eksploatacji kolektorów z niewielkim wydatkiem masowym przepływającej przez nie wody. W takich wypadkach drastycznie maleje sprawność energetyczna kolektorów (rys. 1,2,3). Pomimo tej niedogodności, z uwagi na występujące w naszej strefie klimatycznej częste krótkotrwałe zachmurzenia w sezonie letnim, zalecane jest stosowanie instalacji słonecznych z niewielkim przepływem wody



Rys. 2. Przebiegi energii magazynowanej (Q) w zbiorniku wodnym, chwilowej sprawności kolektora η oraz zmiany temperatury wody T w pięciu równoodległych poziomach zbiornika (linie z niższą temperaturą dotyczą poziomów niższych) przy temperaturze początkowej wody 10°C (warunki zewnętrzne – przeciętny dzień lipca)



Rys. 3. Działanie (patrz opis pod rys. 2) klasycznej instalacji CWU przy temperaturze początkowej w zbiorniku równej 30°C

przez kolektory, rzędu $5\div 10 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ powierzchni absorbera [2]. Są to tzw. kolektory typu „low flow” pozwalające na uzyskanie wymaganej przez użytkownika temperatury wody już po jej jednokrotnym przepływie przez kolektor. Instalacja typu „low flow” zapewnia uzyskanie trwałej stratyfikacji termicznej w zbiorniku, jednak nie pozbawiona jest wad. Poza wspomnianą uprzednio niższą sprawnością kolektorów występuje w niej ryzyko zagotowania się wody w kolektorze w upalne dni letnie, pociągające za sobą zniszczenie instalacji. Większe są też straty ciepłe ze zbiornika akumulacyjnego, a korzyści wynikające z istnienia strefy tego zbiornika z wysoką temperaturą wody są okupione mniejszym udziałem energii słonecznej w zaspokojeniu całkowitych potrzeb ciepłych użytkownika [2].

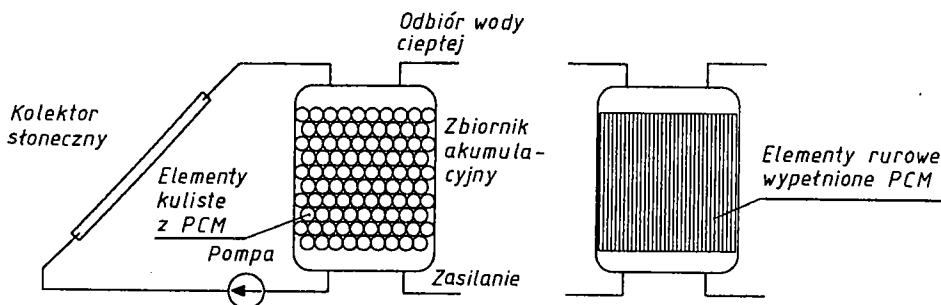
Rysunki 2 i 3 stanowią porównanie pracy instalacji o tych samych gabarytach, jednej typu „low flow” z niewielkim wydatkiem $8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-2}$ wody na 1 m^2 absorbera, drugiej zaś z przepływem normalnie stosowanym, przeszło czterokrotnie większym. Obliczenia wykonano dla wartości nasłonecznienia równych średnim wieloletnim dla lipca i lokalizacji instalacji w rejonie Warszawy. Na rysunku 2 przedstawiono sytuację, gdy temperatura początkowa wody w całej instalacji równa jest 10°C (niższa od temperatury otoczenia), zaś na rys. 3 z temperaturą początkową 30°C może stanowić przybliżenie warunków pracy instalacji w kolejnym dniu sekwencji kilku dni słonecznych. Lewe strony rysunków przedstawiają chwilowe wartości sprawności kolektorów słonecznych i energię zmagazynowaną, zaś prawe ilustrują narastanie temperatury w zbiornikach akumulacyjnych na pięciu równoodległych poziomach wzdłuż wysokości zbiornika. W każdym przypadku układ z dużą prędkością przepływu magazynuje większą ilość energii w ciągu dnia ze sprawnością większą w godzinach porannych i mniejszą w popołudniowych w stosunku do instalacji „low flow”, jednak wartości maksymalne temperatury w zbiorniku tego układu są niższe i praktycznie następuje wyrównanie się temperatury wzdłuż wysokości zbiornika pod koniec dnia.

Badania odbioru ciepłej wody użytkowej wskazują na fakt istnienia pór wyraźnego nasilenia ilości odbieranej wody, co powoduje jej nierównomierną dystrybucję w przekroju dobowym. W takim przypadku temperatura wody może ulegać dużym zmianom wskutek jej mieszania się w zbiorniku, co jest zjawiskiem niekorzystnym, wywołującym zwiększenie poboru mocy ze źródeł innych niż energia promieniowania słonecznego (np. grzanie elektryczne). Dlatego proponuje się zastosowanie w klasycznym magazynującym zbiorniku wodnym dodatkowych elementów magazynujących ciepło z wykorzystaniem ciepła przemian fazowych (w skrócie PCM Phase Change Materials). W prezentowanej pracy rozważa się wpływ na pracę instalacji elementów magazynujących w postaci złoża kulistego wypełniającego część objętości zbiornika akumulacyjnego.

Magazynowanie z równoczesnym wykorzystaniem pojemności cieplnej jednego czynnika i ciepła przemiany fazowej drugiego wydaje się sposobem bar-

dzo obiecującym. W czasie procesu przemiany fazowej mogą być pochłonięte lub wydzielone znaczne ilości ciepła, praktycznie przy niewielkich zmianach temperatury wody otaczającej elementy magazynujące. Dobór odpowiedniego czynnika magazynującego i właściwy podział pojemności cieplnej zbiornika pomiędzy wodę a materiał PCM pozwala na optymalne wykorzystanie energii z kolektorów słonecznych.

Schemat ideowy proponowanej konstrukcji zbiornika akumulującego przedstawiono na rys. 4. Zbiornik akumulacyjny lub jego górna część jest wypełniona cienkościnnymi kulkami z polietylenu zawierającymi materiał PCM i szczelnie



Rys. 4. Schemat ideowy słonecznej instalacji CWU z magazynowaniem energii w dwóch mediach

zamkniętymi. Materiały stosowane w niskotemperaturowym magazynowaniu ciepła (np. woski) są nieznacznie lżejsze od wody ($\rho = 900 \div 940 \text{ kg/m}^3$) i w przypadku ich wykorzystania kulki takie wypełnią górną część zbiornika pod wpływem sił wyporu. Możliwa jest także inna konstrukcja zbiornika z dwoma mediami magazynującymi, wzorowana na wymiennikach ciepła płaszczowo-rurkowych. W takim przypadku woda w pętli kolektorowej przepływa bądź to wewnątrz pionowego pęczka rur, a zbiornik wypełniony jest materiałem PCM, bądź też odwrotnie, elementy magazynujące w postaci walców wpuszczone są w zbiornik z wodą. Ta druga konstrukcja wydaje się korzystniejsza z uwagi na łatwość regulacji stosunku pojemności cieplnej materiału PCM do całkowitej pojemności cieplnej zbiornika. Konstrukcja taka sprzyja również występowaniu, korzystnego ze względu na eksploatację instalacji, zjawiska określanego w literaturze jako „plume entrainment” [9] i polegającego na kanałowym przepływie przez górną gorącą strefę zbiornika akumulacyjnego (bez jej zaburzania) chłodniejszej wody z kolektora do strefy zbiornika o takiej samej gęstości (temperaturze) wody. Zjawisko to zwiększa stratyfikację termiczną w zbiorniku.

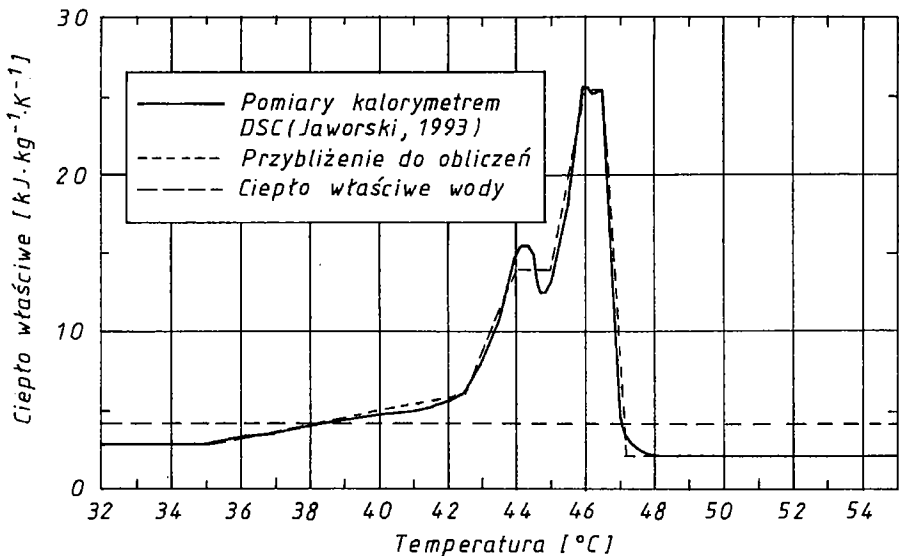
Temperatura wody wykorzystywanej do celów sanitarnych bezpośrednio przed użyciem wynosi z reguły ok. 40°C . W przypadku gromadzenia ciepłej wody na zapas w zbiorniku akumulacyjnym, jej temperatura może być odpowiednio wyższa. Ze względów praktycznych nie jest jednak pożądane magazynowanie wody o temperaturze znacznie przekraczającej temperaturę jej wykorzystywania, gdyż pociąga to za sobą zawsze większe straty ciepłe do

otoczenia. Substancje przewidziane do wykorzystania jako materiały PCM w omawianej konstrukcji powinny więc wykazywać największe zmiany entalpii wraz z temperaturą w zakresie $40\div 55^{\circ}\text{C}$. Nie mogą wchodzić w reakcje chemiczne z wodą i mieć właściwości toksycznych. Powinny być łatwo dostępne i tanie.

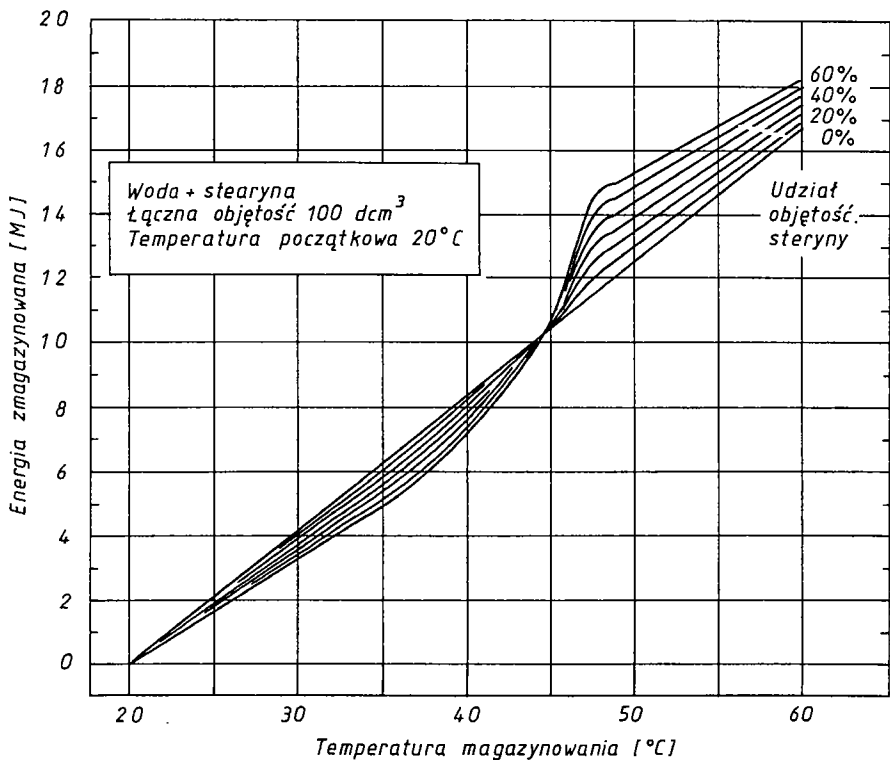
Jak wynika z badań literaturowych [3], do niskotemperaturowego magazynowania energii cieplnej z wykorzystaniem ciepła utajonego przemian fazowych szczególnie nadają się woski. Są to substancje zarówno pochodzenia naturalnego (roślinne lub zwierzęce), jak i syntetyczne o dość skomplikowanej budowie, zawierające najczęściej estry wyższych kwasów tłuszczowych i alkoholi oraz kwasy, alkohole, ketony, etery, węglowodory i in. Do wosków zalicza się również produkty bitumiczne o podobnych właściwościach fizycznych, np. wosk ziemny, cerazynę. Pod względem właściwości termofizycznych woski charakteryzują się stosunkowo wysokimi zmianami entalpii w procesie topnienia. Jednakże z uwagi na złożoną budowę, proces topnienia przebiega w dość szerokim zakresie zmian temperatury. Całkowite przetopienie następuje przy zmianie temperatury rzędu $10\div 20^{\circ}\text{C}$.

Mając na uwadze budowę w przyszłości instalacji eksperymentalnej, a także konieczność oszacowania poprawności przedstawionego w niniejszym opracowaniu modelu matematycznego instalacji, przeprowadzono badania własności cieplnych kilku materiałów do magazynowania energii dostępnych na rynku krajowym. Wykonano je przy użyciu kalorymetru skaningowego DSC7 firmy Perkin-Elmer [10]. Badania te pozwoliły na wyselekcjonowanie dwóch materiałów najlepiej spełniających powyżej sformułowane warunki. Są to: wosk o symbolu PPW-20 produkcji Zakładów Chemicznych Kędzierzyn Koźle oraz stearyna. W dalszych rozważaniach założono, że materiałem PCM jest stearyna. Także w stanowisku eksperymentalnym elementy magazynujące zostały wypełnione stearyną.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność ciepła właściwego stearyny w funkcji temperatury (dla obszaru przemiany fazowej przebiegającej w zakresie $35\div 50^{\circ}\text{C}$) uzyskaną na podstawie badań kalorymetrycznych. Linia łamaną zaznaczono rozkład zastępczy przyjęty w obliczeniach numerycznych. Dla porównania nanesiono także linię odpowiadającą ciepłu właściwemu wody. Pozwala to na stwierdzenie, że stearyna podgrzewana w przedziale temperatury $38\div 47^{\circ}\text{C}$ zmagazynuje większą ilość energii niż woda o tej samej masie. Pojemność układu magazynującego równocześnie w wodzie i stearynie będzie oczywiście zależała od udziału objętościowego (masowego) obu mediów w akumulatorze i temperatury jego pracy. Na rysunku 6 pokazano zmiany pojemności cieplnej zbiornika akumulacyjnego o objętości 100 dm^3 w zależności od udziału objętości materiału PCM (stearyny) w całości, przy magazynowaniu od temperatury początkowej 20°C . Z przedstawionego na rys. 6 wykresu wynika, że zbiornik z dwoma mediami magazynującymi powinien mieć pojemność cieplną nieznacznie mniejszą od pojemności cieplnej zbiornika wodnego w temperaturach do 45°C , zaś powyżej tego punktu – większą.



Rys. 5. Ciepło właściwe stearyny w funkcji temperatury (przemiana fazowa w zakresie 38÷48°C)



Rys. 6. Zmiana ilości magazynowanej energii w zależności od temperatury magazynowania dla różnych stopni wypełnienia akumulatora stearyną

W zastosowaniach praktycznych kwestią nawet istotniejszą od samej pojemności cieplnej zbiornika akumulacyjnego są jego charakterystyki ciepłno-przepływowe i ich wpływ na pracę całej instalacji, a w szczególności na sprawność chwilową kolektorów słonecznych. Analiza tego wpływu jest możliwa jedynie na drodze żmudnych badań eksperymentalnych lub przy zastosowaniu metod symulacji numerycznej dla reprezentatywnego okresu pracy instalacji. Na obecnym etapie zaawansowania pracy ukończono numeryczny model symulacyjny instalacji i przeprowadzono badania eksperymentalne weryfikujące ten model.

2. MODEL MATEMATYCZNY SŁONECZNEJ INSTALACJI CWU ZE ZBIORNIKIEM Z DWOMA MEDIAMI MAGAZYNUJĄCYMI ENERGIĘ

Zgodnie z rys. 4, słoneczna instalacja przygotowania ciepłej wody użytkowej jest złożona z dwóch zasadniczych elementów: kolektora energii promieniowania słonecznego i zbiornika magazynującego. Opis matematyczny pracy takiej instalacji powinien więc zawierać modele tych dwóch głównych elementów z odpowiednimi warunkami sprzęgającymi, jak również uwzględniać oddziaływanie otoczenia (promieniowanie słoneczne, temperatura otoczenia kolektora i zbiornika) oraz odbiór przez użytkownika nagromadzonej energii w postaci ciepłej wody użytkowej.

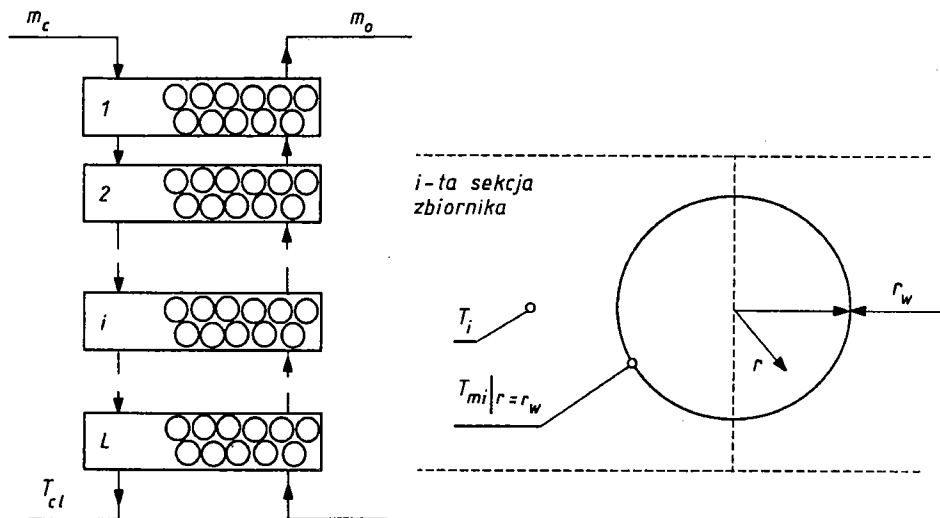
Przyjęte w modelu matematycznym instalacji równanie chwilowego bilansu energetycznego kolektora energii promieniowania słonecznego jest klasycznym równaniem Hottela-Whilliera [1] zapisanym w postaci rozwiniętej:

$$Q_u = A_c F_R [(\tau \alpha)_b R_b G_b + (\tau \alpha)_d R_d G_d - U_c (T_{c1} - T_a)] \quad (1)$$

Wartości F_R , $(\tau \alpha)$, R_b , R_d oraz U_c są opisane odpowiednimi zależnościami funkcyjnymi cytowanymi w literaturze [1,5], a T_{c1} jest temperaturą wody na wlocie do kolektora i jednocześnie temperaturą wody opuszczającej zbiornik magazynujący. Wartości gęstości strumienia promieniowania G oraz temperatury otoczenia T_a mogą być zadawane w postaci odpowiednich zależności funkcyjnych czasu (pory roku i dnia), bądź też wyliczane z dostępnych danych meteorologicznych. Zamieszczone dalej wyniki przykładowych obliczeń symulacyjnych otrzymane zostały przy wykorzystaniu średnich dziesięcioletnich godzinowych sum promieniowania dla obszaru Polski [4].

Przyjęty model matematyczny zbiornika magazynującego jest zmodyfikowanym modelem strefowym (rys. 7) z kontrolowanym poziomem wlotu do strefy (woda wpływająca z kolektora do zbiornika zajmuje bezpośrednio miej-

sce w strefie zbiornika z lokalną gęstością wody najbliższą gęstości wody opuszczającej kolektor [7,8]. Uwzględniono w nim zjawisko stratyfikacji termicznej w zbiorniku, wymianę ciepła między wodą i elementami z PCM oraz straty ciepła do otoczenia przez ścianki zewnętrzne. Ponieważ wymiana ciepła między wodą a kulami z PCM jest determinowana przez chwilowy stan termiczny materiału wewnątrz kuli, więc równolegle opisywane były zjawiska nieustalonego przewodzenia ciepła wraz z przemianą fazową materiału PCM dla każdej strefy zbiornika osobno.



Rys. 7. Podział zbiornika akumulacyjnego na strefy

Równanie będące bilansem energetycznym wody wypełniającej w danym kroku czasowym strefę i zbiornika, zgodnie z oznaczeniami na rys. 7 przyjmuje postać:

$$V_i \rho_f c_f \frac{dT_i}{dt} = \gamma_i m_c c_f (T_{i-1}^* - T_i) + m_o c_f (T_{i+1} - T_i) +$$

$$+ h n_i A_k (T_{mi} |_{r=r_w} - T_i) + U_s A_{si} (T_{sa} - T_i); \quad i \in \langle 1, L \rangle \quad (2)$$

Gwiazdka * przy temperaturze wody T_{i-1} oznacza jej specjalne traktowanie w modelu zbiornika. Dla strefy najwyższej $i = 1$ (rys. 7) temperatura ta jest równa temperaturze wody opuszczającej kolektor przy spełnieniu warunku, że jest ona wyższa od T_1 . Wówczas współczynniki γ dla wszystkich stref zbiornika przyjmują wartość 1, zaś temperatury T_{i-1} są temperaturami stref leżących powyżej, z wyjątkiem oczywiście wspomnianej na wstępie strefy pierwszej. Jeżeli temperatura wody opuszczającej kolektor jest niższa niż temperatura pierwszej lub kilku kolejnych stref (np. $k - 1$), lecz wyższa od T_k , wówczas

w równaniu dla strefy k temperatura T_{k-1} przyjmowana jest jako równa temperaturze wody opuszczającej kolektor, zaś dla wszystkich stref leżących powyżej współczynniki γ równe są 0.

Równania (2) są sprzęgnięte z równaniami nieustalonego przewodzenia ciepła połączonego z przemianą fazową w elementach kulistych:

$$\frac{\partial(c_{mi} \rho_{mi} T_{mi})}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k_{mi} \frac{\partial T_{mi}}{\partial r} \right) \quad i \in < 1, L > \quad (3)$$

poprzez warunek

$$hA_k (T_{mi}|_{r=r_w} - T_i) = -k_{mi} \frac{\partial T_{mi}}{\partial r} \Big|_{r=r_w} \quad (4)$$

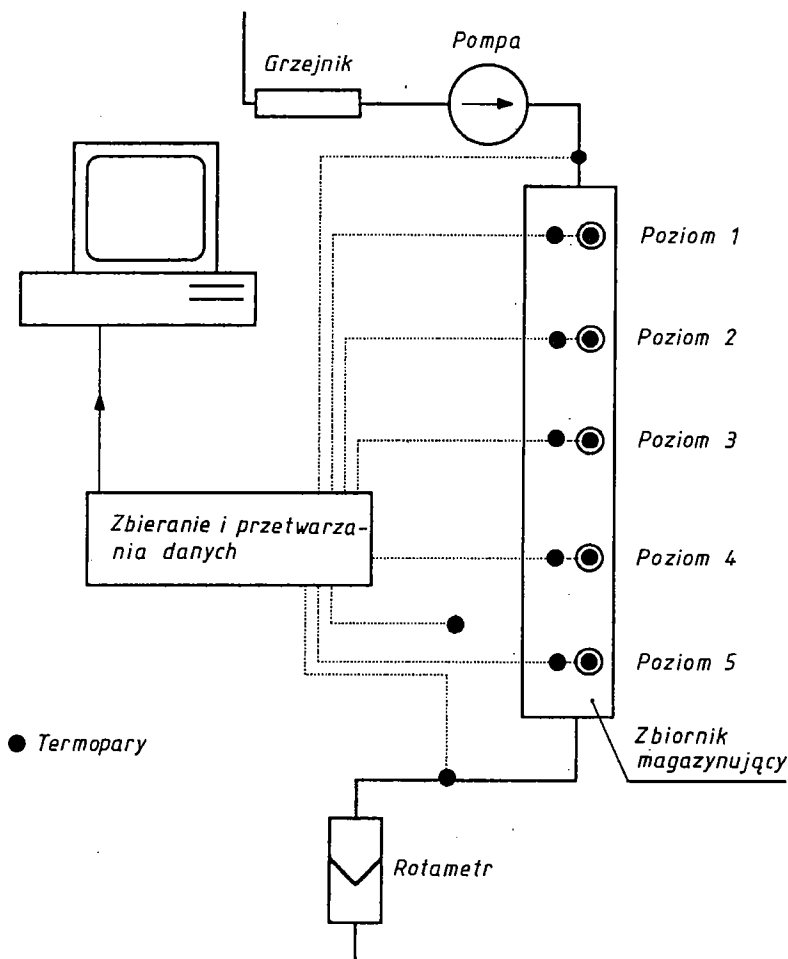
gdzie c_{mi} , ρ_{mi} , k_{mi} – ciepło właściwe, gęstość, przewodność cieplna materiału PCM są funkcjami $T_{mi}(\tau)$ zależnymi również od r , budowanymi w trakcie rozwiązywania równania (3).

Szczegółowy opis metody rozwiązania równania nieustalonego przewodzenia ciepła z równoczesną przemianą fazową zamieszczono w [6].

3. STANOWISKO EKSPERYMENTALNE DO BADAŃ ZBIORNIKA I PRZEBIEG BADAŃ

W celu weryfikacji przedstawionego powyżej modelu matematycznego zbiornika zbudowano proste stanowisko badawcze, którego schemat ideowy pokazany jest na rys. 8. W skład stanowiska wchodzi zbiornik z pleksiglasu o wysokości 1 m i średnicy wewnętrznej 105 mm. We wnętrzu zbiornika umieszczono 171 piłeczek pingpongowych o średnicy 38 mm wypełnionych stearyną, zajmujących łącznie 48,2% objętości zbiornika (4,175 dm³). W pięciu elementach magazynujących, umieszczonych w środku pięciu równych objętościowo sekcjach zbiornika, zainstalowano termopary Cu-Ko ze złączami zlokalizowanymi w centrum elementu. Na tych samych poziomach zbiornika umieszczono termopary do pomiaru lokalnej temperatury wody. Za pomocą termopar mierzono także temperaturę wody na wlocie i wylocie ze zbiornika oraz temperaturę otoczenia. Sygnały ze wszystkich termopar zbierane były w programowalnym przetworniku analogowo-cyfrowym MOLYTEK 4702 i rejestrowane przez komputer IBM PC. Woda zasilająca zbiornik była podgrzewana do wymaganego poziomu temperatury (tylko w trakcie symulacji ładowania zbiornika) w przepływowym podgrzewaczu elektrycznym. Wydatek wody przepływającej przez zbiornik był kontrolowany za pomocą rotametru.

Przeprowadzono badania ładowania (gromadzenia energii cieplnej w zbiorniku) i rozładowywania. W trakcie symulacji ładowania zbiornik, o niskiej początkowej temperaturze w całej swojej objętości, był zasilany od góry stałym



Rys. 8. Schemat stanowiska eksperymentalnego

wydatkiem wody o ustalonej temperaturze przewyższającej górną temperaturę zakresu przemiany fazowej stearyny. Wskazania wszystkich termopar rejestrowane były co 30 s, aż do momentu osiągnięcia przez układ stanu równowagi termicznej. Pomiar różnicy temperatur wody między wylotem a wlotem do zbiornika akumulacyjnego, po osiągnięciu podczas jego „ładowania” stanu ustalonego, pozwalał na oszacowanie współczynnika strat ciepłych zbiornika. Przy rozładowywaniu, przez zbiornik przepływała (wlot u góry) zimna woda z sieci wodociągowej ze stałym wydatkiem.

4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH – PORÓWNANIE Z OBLICZENIAMI TEORETYCZNYMI

Rysunki 9÷12 przedstawiają porównanie wyników uzyskanych w trakcie badań eksperymentalnych z obliczeniami teoretycznymi wykonanymi na podstawie opisanego uprzednio modelu matematycznego zbiornika. Trzeba zaznaczyć, że stosowane podczas eksperymentu wydatki masowe wody przepływającej przez zbiornik w granicach $30\div 39 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, zapewniające siedmiokrotną całkowitą wymianę wody w zbiorniku ($4,47 \text{ dm}^3$) w ciągu godziny, były znacznie większe, niż to zazwyczaj ma miejsce przy eksploatacji rzeczywistych instalacji słonecznych, gdzie jednokrotna wymiana wody w zbiorniku trwa od godziny (eksploatacja z dużym wydatkiem) do dziesięciu godzin (kolektory typu „low flow”). Tak duży względny wydatek wody podczas eksperymentu wynikał z wykorzystania do regulacji wydatku i temperatury wody na wlocie do zbiornika układu zasilania będącego w wyposażeniu laboratorium Pracowni Energetyki Słonecznej IPPT PAN, projektowanego do obsługi pełnogabarytowych instalacji słonecznych.

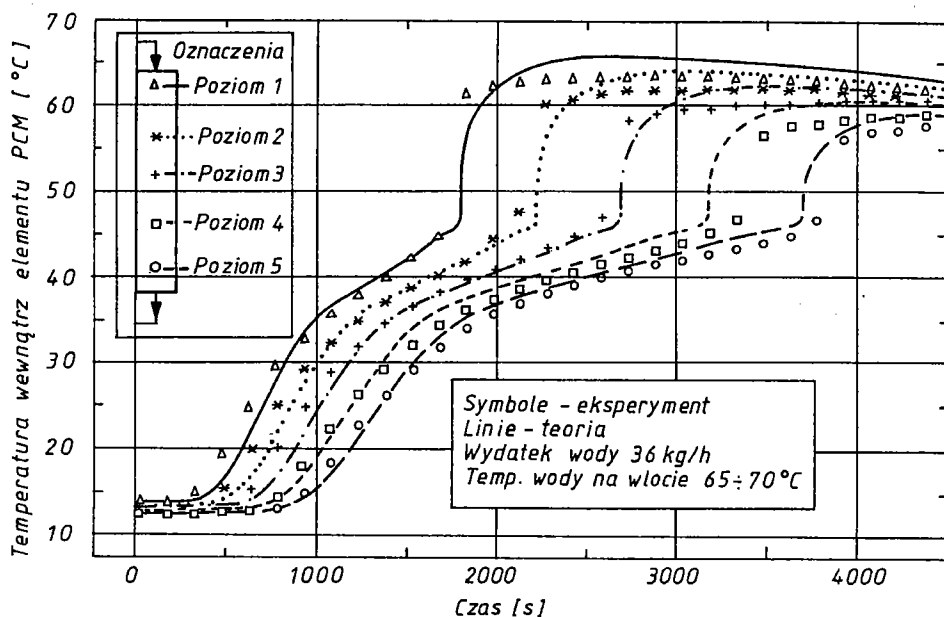
Obliczenia teoretyczne zamieszczone na rys. 9÷12 wykonano przy podziale zbiornika magazynującego na 15 sekcji. Przyjęto przybliżoną zależność ciepła właściwego stearyny od temperatury w postaci linii łamanej przedstawionej na rys. 5.

Rysunek 9, przedstawiający zmiany w czasie temperatury w środku elementów magazynujących umieszczonych na pięciu różnych poziomach zbiornika, wskazuje na pewne niedokładności modelowania zjawisk zachodzących w materiale PCM, w szczególności po jego całkowitym przetopieniu. W obliczeniach teoretycznych temperatury środków elementów łagodniej dochodzą do stanu ustalonego, niż to wynika z eksperymentu. Przyczyna tych rozbieżności może leżeć w fakcie, iż po całkowitym stopieniu się w materiale PCM występują prądy konwekcyjne prowadzące do szybkiego wyrównania się temperatury w całym elemencie, podczas gdy w obliczeniach teoretycznych założono transport energii tylko na drodze przewodzenia.

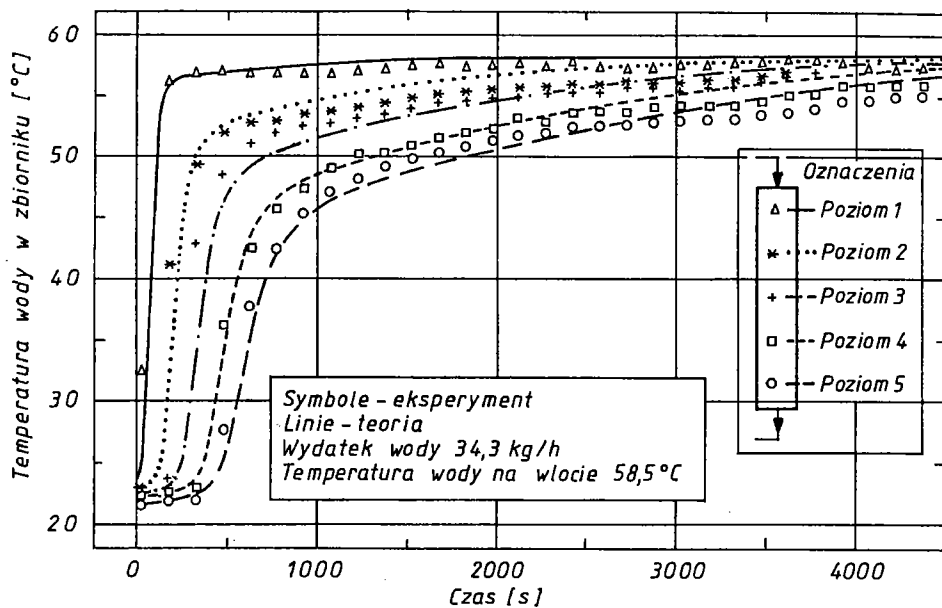
Na rysunku 10 przedstawiono zmiany temperatury wody w trakcie ładowania zbiornika akumulacyjnego, w punktach pomiarowych leżących na tych samych poziomach zbiornika, co elementy z PCM uzbrojone w termopary. Podobnie, jak to było w przypadku pomiarów temperatury w środku elementów z PCM, niewielkie różnice między eksperymentem a teorią pojawiają się dla stanów bliskich pełnego naładowania zbiornika. Różnice te mogą być efektem sygnalizowanego powyżej wpływu konwekcji w fazie ciekłej PCM, gdyż równania bilansu sekcji zbiornika (2) były rozwiązywane w sprzężeniu z równaniami przewodzenia w elementach PCM (3) poprzez warunek (4).

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono takie samo zestawienie wyników obliczeń teoretycznych i eksperymentu jak omówione powyżej, ale dla procesu

rozładowywania zbiornika. Porównując przebiegi temperatury w środku elementów z PCM w trakcie ich nagrzewania (rys. 9) oraz chłodzenia (rys. 11) można zaobserwować jakościowe różnice między tymi procesami. O ile przy

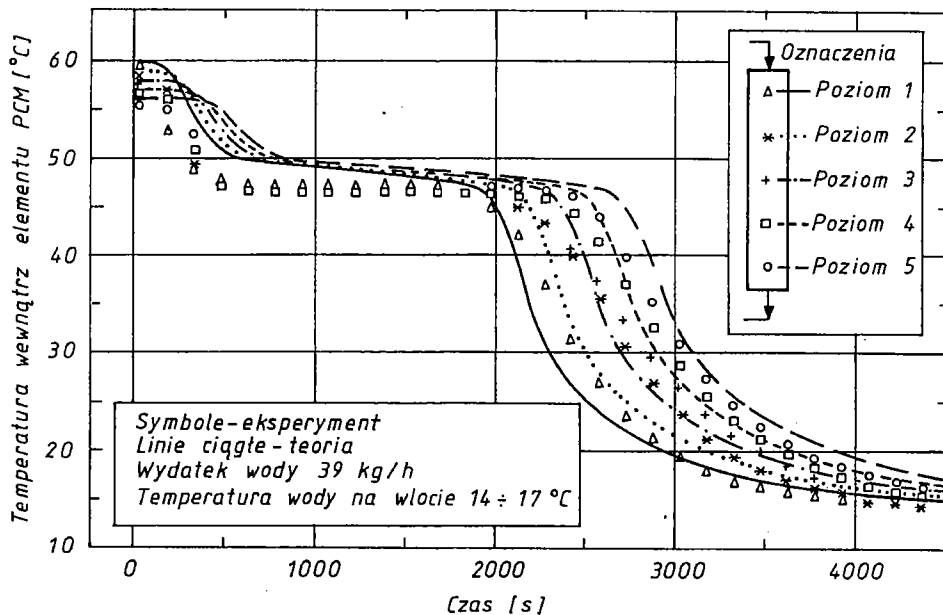


Rys. 9. Przebiegi temperatury w środku elementów PCM w trakcie ładowania zbiornika

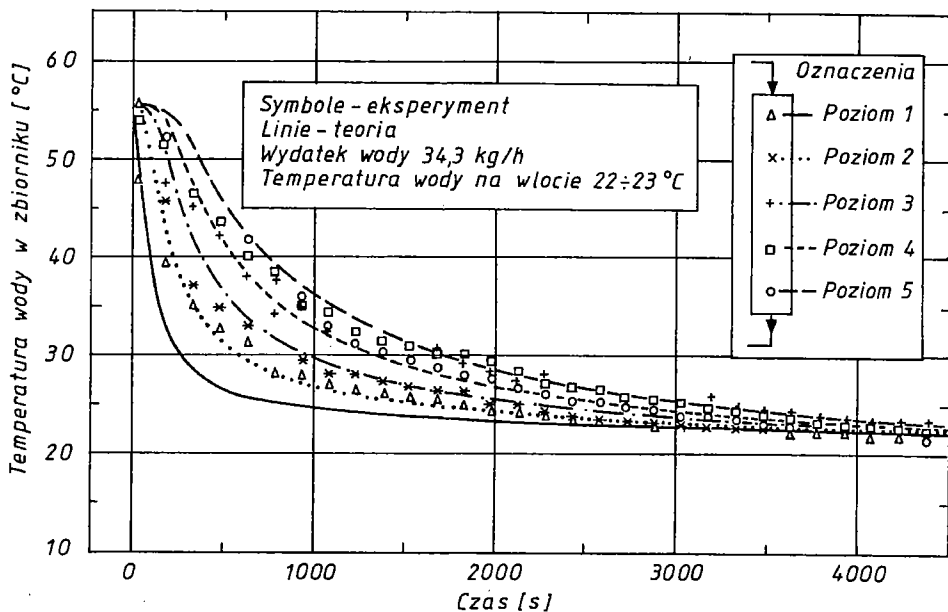


Rys. 10. Zmiany temperatury wody w trakcie ładowania zbiornika

ogrzewaniu (ładowaniu) elementów ich temperatura w całym zakresie przemiany fazowej ($35 \div 48^\circ\text{C}$) narasta ze stałą w przybliżeniu prędkością (rys. 9),



Rys. 11. Przebiegi temperatury w środku elementów PCM w trakcie rozładowywania zbiornika



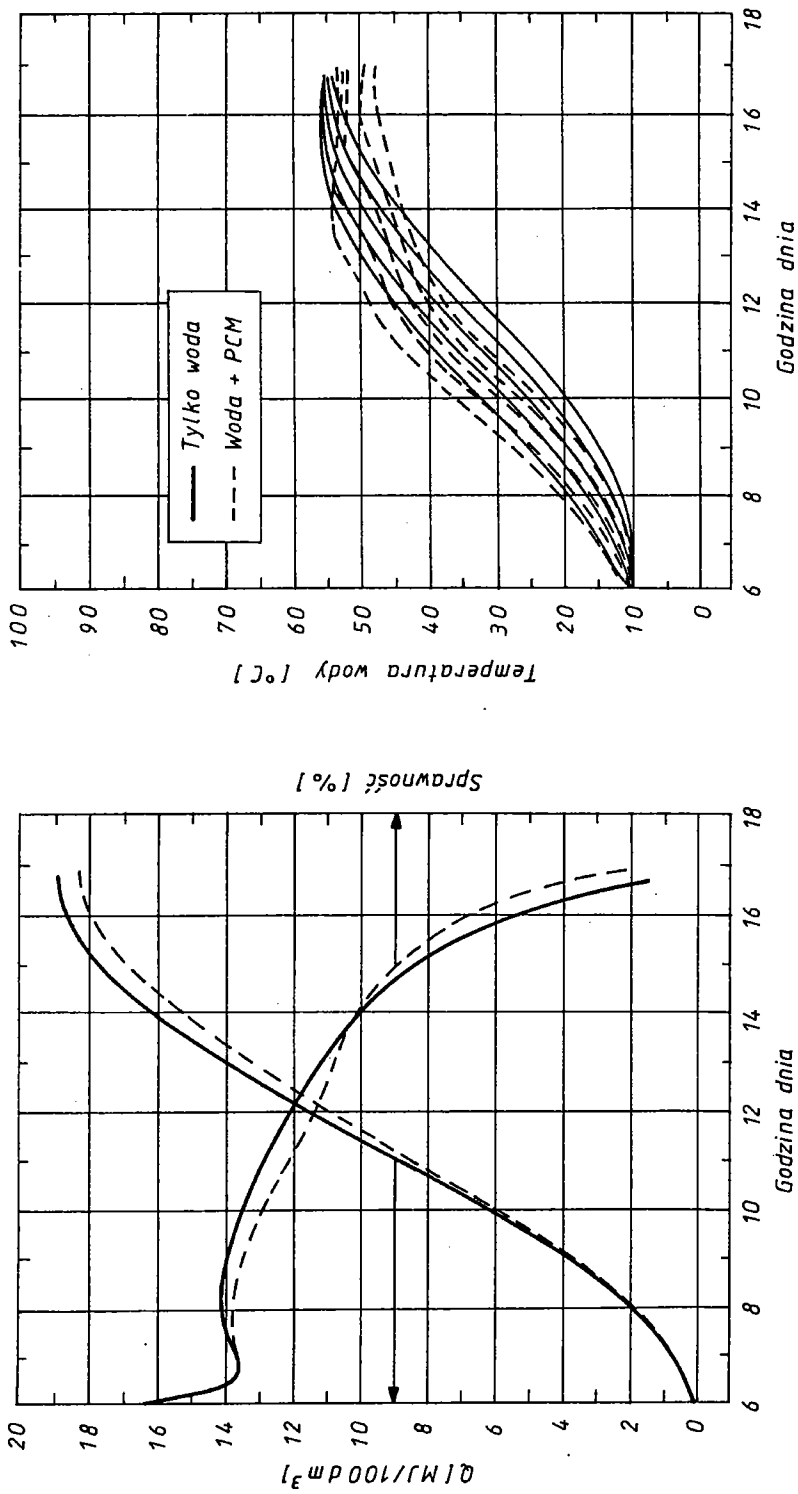
Rys. 12. Zmiany temperatury wody w trakcie rozładowywania zbiornika

o tyle przy rozładowywaniu temperatura w centrum elementu pozostaje praktycznie stała przez cały okres zestalania się materiału PCM (rys. 11). Jest to spowodowane zarówno faktem, że większa część ciepła przemiany fazowej stearyny jest oddawana (lub pobierana) w temperaturze $46\div 47^{\circ}\text{C}$, (rys. 5), jak również stwierdzonym w trakcie badań kalorymetrem DSC innym nieco kształtem krzywej z rys. 5 dla ogrzewania (łagodniejsze przebiegi), a innym dla chłodzenia, przy tym samym całkowym efekcie cieplnym przemiany fazowej. W obliczeniach teoretycznych przyjęto zależność funkcyjną ciepła właściwego stearyny od temperatury dla zakresu przemiany fazowej jako wartość uśrednioną z przebiegów topnienia i krzepnięcia. Stąd też na rys. 11 w symulacji numerycznej temperatura w centrum elementów łagodnie maleje w procesie krzepnięcia, podczas gdy w eksperymencie pozostaje praktycznie stała.

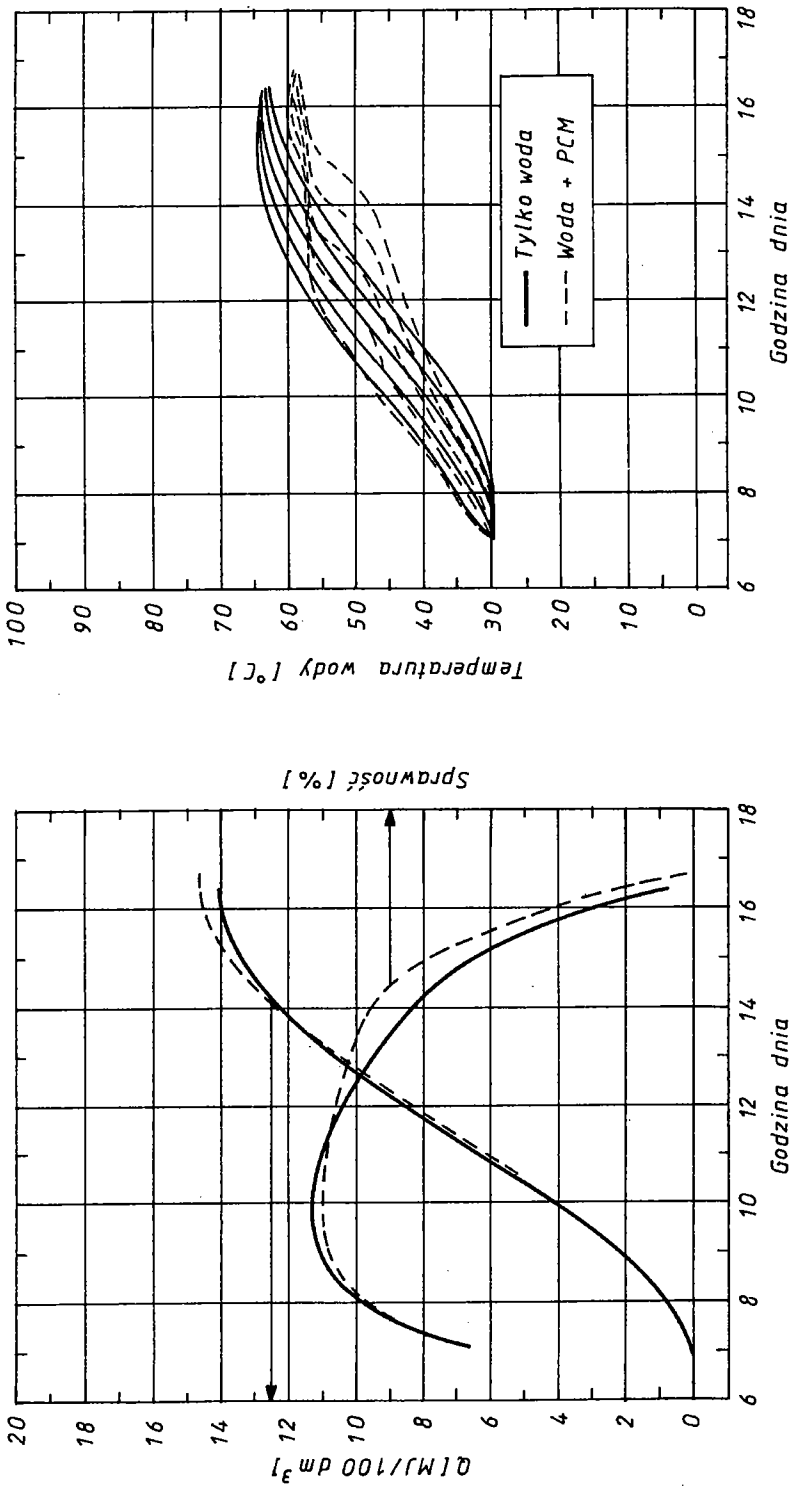
Analizując wyniki eksperymentu chłodzenia można zauważyć rozbieżności między obliczeniami teoretycznymi a wynikami eksperymentu dla najwyższego poziomu zbiornika, w szczególności dotyczące zmian temperatury wody (rys. 12). Trudno w chwili obecnej w jednoznaczny sposób wytłumaczyć te różnice. Mogą mieć tu swój udział zarówno niezbyt precyzyjnie określone parametry równań modelu matematycznego (np. współczynniki przejmowania ciepła, strat cieplnych do otoczenia, przewodności cieplnej stearyny itp.), jak i zjawiska uboczne zaistniałe w trakcie eksperymentu (np. nierównomierność rozkładu przepływu zimnej wody w zbiorniku). Trzeba tu dodatkowo nadmienić, że w rzeczywistych instalacjach słonecznych w trakcie rozładowania zbiornika zimna woda doprowadzana jest do najniższej sekcji zbiornika, nie zaś do najwyższej, jak uczyniono podczas eksperymentu (z powodów czysto technicznych).

5. WSTĘPNE WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH PRACY INSTALACJI

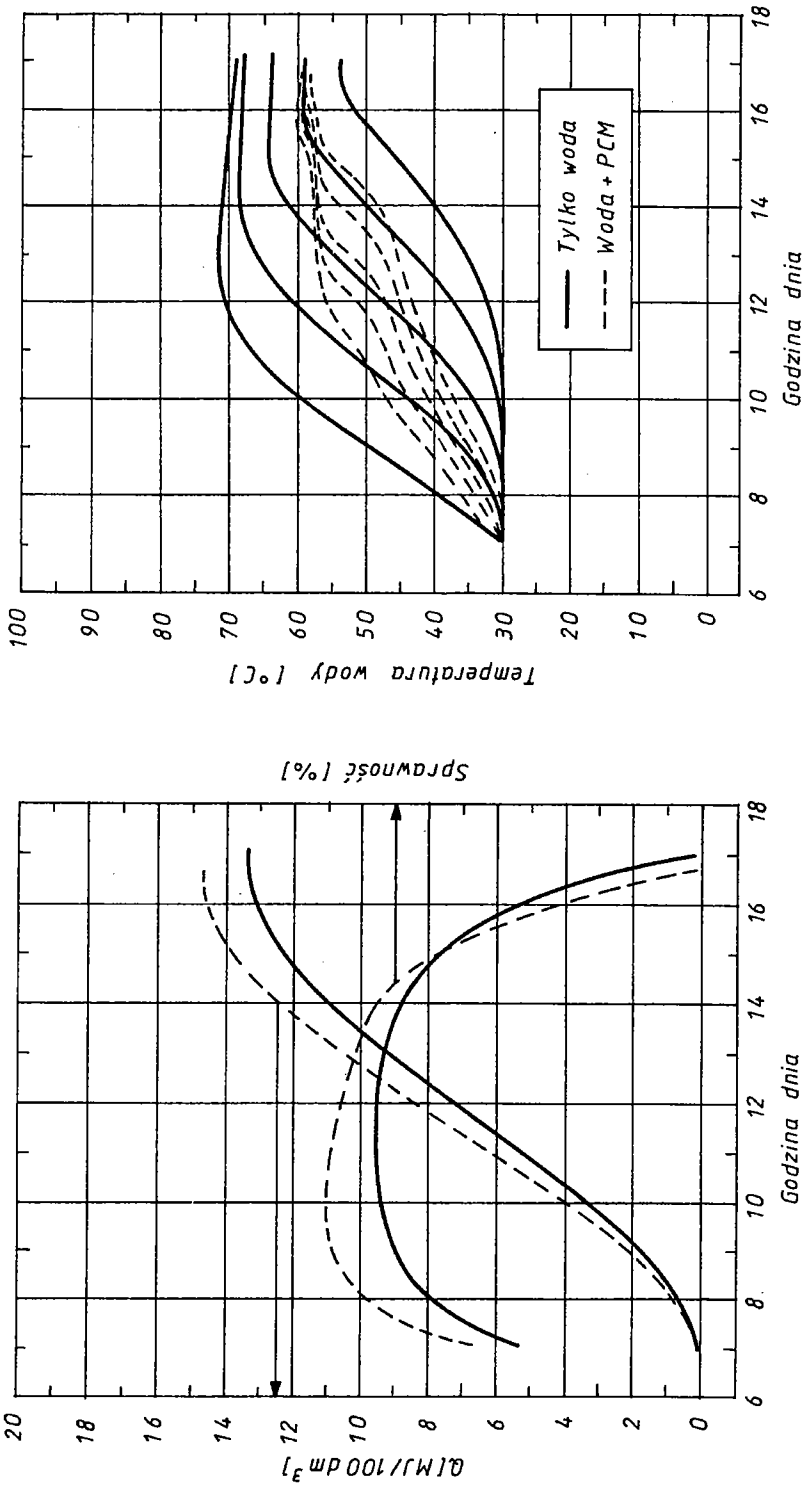
Ekspertyzmy przeprowadzone z modelem zbiornika z dwoma mediami magazynującymi potwierdzają poprawność zaproponowanego opisu matematycznego zbiornika w stopniu wystarczającym do wykorzystania tego opisu w symulacji numerycznej działania całej instalacji słonecznej. Na obecnym etapie pracy została ukończona pierwsza seria obliczeń symulacyjnych, chwilowo jeszcze przy założeniu braku odbioru ciepłej wody przez użytkownika instalacji w trakcie gromadzenia energii. Uwzględnienie w obliczeniach symulacyjnych poboru wody ze zbiornika wymaga wcześniejszej analizy najbardziej prawdopodobnego w polskich warunkach dobowego rozkładu zużycia CWU. Na rysunkach 13-15 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem podanego uprzednio modelu symulacyjnego instalacji. Każdy z tych rysunków zawiera porównanie pracy dwóch identycznych słonecznych



Rys. 13. Porównanie działania instalacji tradycyjnej i proponowanej przy wydatku wody przepływającej przez kolektor równym $27 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ i temperaturze początkowej 10°C (opis linii – patrz rys. 2)



Rys. 14. Porównanie działania instalacji tradycyjnej i proponowanej przy temperaturze początkowej w zbiorniku 30°C (znaczenie linii – jak na rys. 2)



Rys. 15. Porównanie osiągnięć instalacji tradycyjnej pracującej w reżimie „low flow” z instalacją proponowaną (znaczenie linii – jak na rys. 2)

instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej, jednej ze zbiornikiem wodnym, drugiej z wypełnieniem zbiornika w 57,5% objętości złożem kulistym o średnicy kulek 38 mm zawierających stearynę. W odniesieniu do obu porównywanych instalacji założono istnienie zbiornika magazynującego o stosunku wysokości do średnicy jak 3:1 oraz stosunku pojemności zbiornika do powierzchni kolektorów równej 67 dm^3 na 1 m^2 powierzchni absorbera (kolektor słoneczny o powierzchni absorbera $1,5 \text{ m}^2$ i odpowiadający mu zbiornik magazynujący o pojemności 100 dm^3). Lewy wykres każdego rysunku przedstawia chwilowe wartości sprawności kolektorów słonecznych oraz narastanie w czasie energii zakumulowanej w zbiorniku, prawy zaś – zmiany temperatury czynnika w najwyższej i najniższej strefie zbiornika. Nasłonecznienie dzienne przyjęte w obliczeniach równe było $22 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dzień}^{-1}$ na płaszczyznę poziomą. Pochylenie kolektora względem poziomu wynosiło 45° , zaś temperatura otoczenia była zmienna w zakresie od 16°C przed wschodem słońca do $22,6^\circ\text{C}$ we wczesnych godzinach popołudniowych [4,7].

Rysunek 13 przedstawia porównanie pracy obu instalacji przy założeniu przepływu wody w pętli kolektora z wydatkiem $27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (pełna wymiana wody w zbiorniku tylko wodnym w czasie ok. 2,5 h, dla zbiornika z wypełnieniem PCM w czasie przeszło dwa razy krótszym) i temperaturze początkowej wody w całej objętości zbiornika równej 10°C (niższej od minimalnej temperatury otoczenia). W założonych warunkach instalacja bez wypełnienia gromadzi w ciągu dnia nieznacznie więcej energii w porównaniu z instalacją z PCM przy podobnych zmianach temperatury wody w zbiorniku. Dodatkowo, brak charakterystycznych „przebiegów” linii temperatur dla układu z PCM (prawy wykres rys. 14) sugeruje, że przy tak niskiej temperaturze początkowej nie nastąpiła jeszcze pełna przemiana fazowa materiału PCM.

Przyjęcie w obu instalacjach temperatury początkowej wody w godzinach porannych równej 30°C , co w sposób uproszczony modeluje kolejny dzień pracy instalacji w sekwencji kilku dni słonecznych, zmienia te proporcje na korzyść instalacji z PCM (rys. 14). Różnice w pracy obu ww. instalacji, jak to wynika z rys. 14, są niewielkie. Ilość nagromadzonej w zbiorniku energii po całym dniu pracy jest praktycznie taka sama w instalacji tradycyjnej i proponowanej z PCM. Instalacja z PCM w porównaniu z tradycyjną osiąga nieznacznie mniejsze chwilowe sprawności w godzinach przedpołudniowych, co jest jednak kompensowane w drugiej połowie dnia. Bardziej widoczne są różnice w narastaniu temperatury wody w zbiorniku. Umieszczenie w nim elementów z PCM ogranicza nadmierny wzrost temperatury wody w zbiorniku w godzinach popołudniowych przy zachowaniu praktycznie tej samej ilości energii zmagazynowanej.

Interesujące wydaje się porównanie działania instalacji z PCM i instalacji tylko wodnej o tych samych gabarytach, ale pracującej w reżimie „low flow” wspomnianym na początku niniejszego opracowania. Rysunek 15 przedstawia

takie porównanie otrzymane dla symulacji z wydatkiem wody w instalacji tylko wodnej równym $8 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ powierzchni absorbera i $27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ dla instalacji z PCM. W tym przypadku zaznacza się wyraźna przewaga proponowanego rozwiązania technicznego. Instalacja z PCM przez cały dzień pracuje z większą sprawnością osiąganą przez kolektor, czemu towarzyszy większa ilość energii zgromadzonej w zbiorniku. Maksymalne temperatury wody w zbiorniku są równocześnie o około 10°C niższe niż w instalacji „low flow”, a zatem mniejsze będą straty ciepłone ze zbiornika i wyższa sprawność magazynowania w okresie nocnym i dni bezsłoneczne.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona w sposób ogólny koncepcja zbiornika magazynującego ciepło wymaga przeprowadzenia dalszej dokładnej analizy teoretycznej, która pozwoli określić jego przydatność w praktycznych zastosowaniach. Zamieszczone wyniki wstępnych analiz wpływu nowego rozwiązania konstrukcyjnego zbiornika na działanie całej instalacji wydają się obiecujące. W szczególności umieszczenie elementów z PCM w zbiorniku w sposób korzystny modyfikuje jego charakterystyki termiczne.

Planowane dalsze dokładne numeryczne badania symulacyjne powinny pozwolić na dobór najkorzystniejszych, ze względu na eksploatację, parametrów technicznych zbiornika przed przystąpieniem do budowy instalacji eksperymentalnej w skali naturalnej. W szczególności warto przeanalizować wpływ wymiarów i kształtu elementów z PCM oraz stopnia wypełnienia nimi zbiornika na pracę instalacji, jak również zachowanie się instalacji podczas ładowania zbiornika z równoczesną konsumpcją ciepłej wody przez użytkownika. Interesująca wydaje się także nie omawiana tutaj koncepcja wypełnienia poszczególnych stref zbiornika materiałami o różnych temperaturach przejść fazowych. Planowane w dalszych etapach pracy badania eksperymentalne instalacji z PCM powinny zweryfikować zalety i ewentualne wady proponowanej konstrukcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. A. Duffie, W. A. Beckmann: *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York 1991.
- [2] S. Furbo: *Low flow solar systems in Denmark*. Sun World, 1992, Vol.16, No. 4.
- [3] R. Domański, P. Bratkowski, T. Bułanowski, M. Jaworski, R. Wnuk: *Badanie własności cieplnych wybranych materiałów do magazynowania energii cieplnej oraz procesów wy-*

miany ciepła przy ładowaniu i rozładowywaniu układu magazynującego. Raport ITC PW nr 6.1.6.01 PR-8, 1985.

- [4] K. Jaskólski: *Struktura promieniowania słonecznego w Polsce, jej zmiany w różnych miejscach kraju.* Raport Instytutu Energetyki nr 6.1.01.01. PR-8, 1981.
- [5] B. Y. Liu, R. C. Jordan: *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation.* Solar Energy, 1960, Vol. 4, No 3.
- [6] Z. Pluta, R. Wnuk: *Modelowanie przemiany fazowej w magazynie energii słonecznej z kulistym złożem magazynującym.* Prace IPPT PAN, 36/1993.
- [7] R. Wnuk: *Numeryczne modelowanie aktywnego bezpośredniego systemu podgrzewu ciepłej wody użytkowej z wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego.* Prace IPPT PAN, 38/1991.
- [8] D. Wolf, A. N. Sembira, A. I. Kudish: *Dynamic Simulation and Parametric Sensitivity Studies on Central Solar Domestic Hot Water System.* Energy, 1984, Vol.9, No 2.
- [9] E. M. Kleinbach, W. A. Beckman, S. A. Klein: *Performance Study of One-Dimensional Models for Stratified Storage Tanks.* Solar Energy, 1993, Vol.50, No.2.
- [10] M. Jaworski: *Badania właściwości cieplnych materiałów do magazynowania energii.* Opracowanie wewnętrzne IPPT PAN, 1993, nie publikowane.
- [11] R. Domański: *Magazynowanie energii cieplnej.* PWN, Warszawa 1990.

THE INFLUENCE OF PHASE CHANGE MATERIAL ADAPTED TO STORAGE TANK ON SOLAR DOMESTIC HOT WATER ACHIEVEMENTS

S u m m a r y

The application of storage tank with double medium (water and phase change material – PCM) can significantly improve Solar Domestic Hot Water (SDHW) system performance. In the considered construction of SDHW system, storage tank is filled up with thin-walled polyethylene spheres enclosing stearine. The tank with vertical tubes containing stearine was also built and experimentally tested. The stearine was chosen as a PCM material due to its commercial availability and comparatively low price. The thermal properties of employed material were obtained from calorimetric Differential Thermal Analyser (DTA). The stearine shows phase change spread over temperature range from 35 to 48°C with accompanying heat effect 160 kJ·kg⁻¹. The paper presents mathematical model of main system components. The mathematical model of overall storage tank is modified mixing multi-zone model. The thermal stratification, heat transfer from water to PCM elements and tank heat losses have been taken into account. Therefore, the mathematical model of transient heat transfer with simultaneous phase change in single spherical and tube element filled up with PCM was worked out. An own enthalpy method for this problem solution has been carried out. Presented results of numerical calculations were compared with experimental data showing satisfactory agreement. The included calculations for such system working under Polish climatic conditions show a major influence of PCM material inside the storage tank on instantaneous heater efficiency. The storage tank with water and PCM can more successfully collect energy when working in the sequence of several sunny days in comparison with traditional water tank.

ВЛИЯНИЕ ВЕЩЕСТВ ПОДЛЕЖАЩИХ ФАЗОВЫМ ПРЕВРАЩЕНИЯМ, РАЗМЕЩЕННЫХ В АККУМУЛИРУЮЩЕМ БАКЕ, НА ДОСТИЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ ПОДОГРЕВА ВОДЫ

Краткое содержание

Одновременное использование аккумулирования тепла за счет трудоемкости воды и теплоты фазового превращения может заметно увеличить эффективность солнечной системы подогрева воды. В предлагаемой новой конструкции установки, аккумулирующей тепло, водяной бак наполнен (кроме воды) шарообразными элементами содержащими стеарин. Торговый стеарин, как измерено, подвергается фазовым превращениям в интервалах температур $35\div 50^{\circ}\text{C}$ и имеет удельную теплоту плавления 160 кДж/кг . В статье представлены основные зависимости, описывающие процессы теплообмена энергии в отдельных частях установки (солнечном коллекторе, и особенно в баке, для которого эти зависимости представляют собой новый подход к математическому описанию бака). Результаты численных расчетов, полученные на основе теоретического моделирования, были сравнены с результатами экспериментальных исследований. Подробно описан испытательный лабораторный стенд и условия измерений. Используя численную имитационную программу произведен примерный анализ работы рассматриваемой установки подготовки снабжения теплой водой для выбранного периода в климатических условиях варшавского района, а результаты сравнены с работой традиционной установки. Полученные результаты показывают достоинства представленной конструкции, особенно когда установка работает в режиме нескольких солнечных дней.