

- 7.2.1. – konwekcja jednofazowa
- 7.2.3. – przewodnictwo
- 5.9.13. – badania doświadczalne

Z. Pluta, R. Wnuk, M. Jaworski

**MODELOWANIE PRACY
SŁONECZNEJ INSTALACJI CWU
ZE ZBIORNIKIEM AKUMULACYJNYM
Z DWOMA MEDIAMI
MAGAZYNUJĄCYMI ENERGIĘ CIEPLNĄ**

35/1993



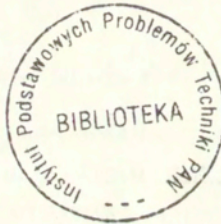
P. 269

W A R S Z A W A 1 9 9 3

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 30 sierpnia 1993 r.



56656



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark.wyd. 1,5 Ark.druk.2,0
Oddano do drukarni w październiku 1993 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul.Jasna 1

<http://rcin.org.pl>

Zbysław Pluta
Ryszard Wnuk
Pracownia Energetyki Słonecznej
Centrum Helio - Ekostruktur IPPT PAN

Maciej Jaworski
Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

MODELOWANIE PRACY SŁONECZNEJ INSTALACJI CWU ZE ZBIORNIKIEM AKUMULACYJNYM Z DWOMA MEDIAMI MAGAZYNUJĄCYMI ENERGIĘ CIEPLNĄ

Osiągi słonecznej instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej (CWU) mogą być znacznie poprawione poprzez umieszczenie w wodnym zbiorniku magazynującym elementów z substancjami ulegającymi przemianom fazowym połączonym ze znacznymi efektami cieplnymi (PCM). W prezentowanej pracy zaproponowano opis matematyczny instalacji CWU z dwoma mediami magazynującymi. Przeprowadzono weryfikację eksperymentalną modelu matematycznego zbiornika dla kulistego złoża magazynującego wypełnionego stearyną. Przeprowadzono także przykładowe obliczenia symulacyjne pracy instalacji dla polskich warunków klimatycznych wykazując istotny wpływ elementów z PCM na charakterystyki eksploatacyjne instalacji.

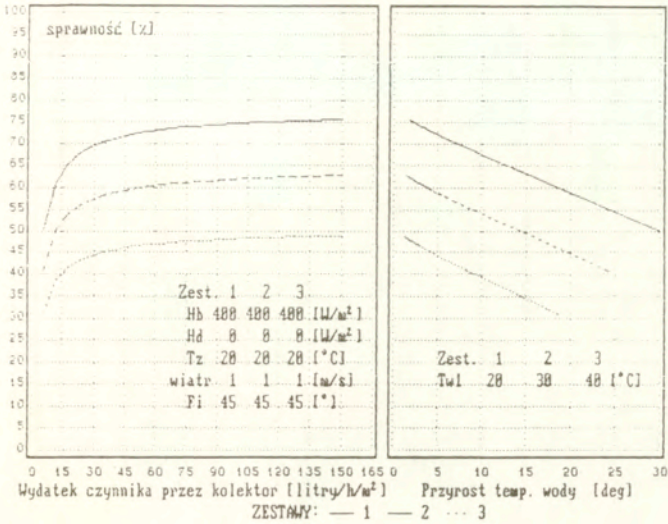
Wstęp

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, jak i sposobu eksploatacji. Zwiększenie efektywności działania systemów pozyskiwania energii ze źródeł niekonwencjonalnych można obecnie osiągnąć dwiema drogami - poprzez wprowadzanie nowych, doskonalszych rozwiązań technicz-

nych 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 z przemianą fazową modyfikuje charakterystykę termiczną zbiornika zmieniając tym samym charakterystyki eksploatacyjne całej instalacji.

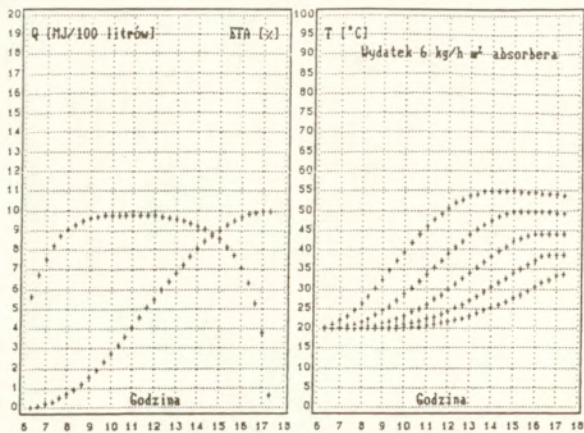
1. Różnice w konstrukcji i eksploatacji instalacji tradycyjnej i proponowanej

W klasycznych słonecznych instalacjach przygotowania CWU do magazynowania energii cieplnej uzyskanej z kolektorów słonecznych stosowany jest zbiornik wodny o objętości od 50 do 70 litrów 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 węzownicy 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 wysmukłości zbiornika (stosunku wysokości do średnicy), wydatku masowego wody w obiegu kolektorowym i oczywiście od ilości energii docierającej do kolektorów. Zjawisko stratyfikacji termicznej w zbiorniku akumulacyjnym jest korzystne z uwagi na odbiór ciepłej wody przez użytkownika. Ma on wówczas do dyspozycji wodę o wyższej temperaturze przy tej samej ilości energii zmagazynowanej w zbiorniku. Z drugiej jednak strony, 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). Pomimo tej niedogodności, z

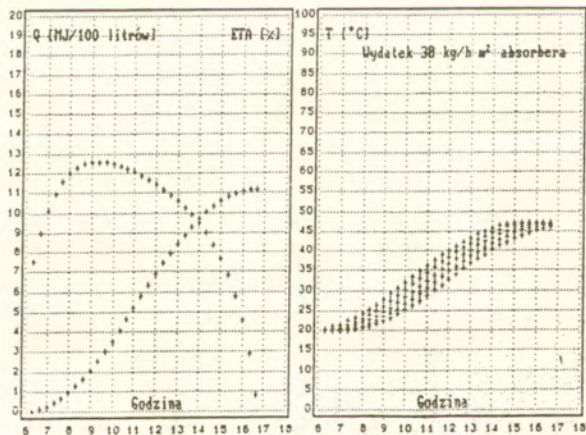


Rys.1 Wpływ natężenia przepływu wody przez kolektor na jego sprawność chwilową dla różnych temperatur wody T_{w1} na wlocie do kolektora

uwagi na występujące w naszej strefie klimatycznej częste krótkotrwałe zachmurzenia w sezonie letnim, zalecane jest stosowanie instalacji słonecznych z niewielkim przepływem wody przez kolektory, rzędu 5 - 10 litrów/h/m² 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 ciepłne ze zbiornika akumulacyjnego, a korzyści wynikające z istnienia strefy tego zbiornika z wysoką temperaturą wody są okupione mniejszym udziałem energii słonecznej w pokryciu całkowitych potrzeb cieplnych użytkownika [2]. Rysunki 2 i 3 stanowią porównanie pracy instalacji o tych samych gabarytach, jednej (rys.2) z przepływem "low - flow" o niewielkim



Rys. 2 Przebiegi energii magazynowanej w zbiorniku wodnym Q, sprawności chwilowe ETA oraz zmiany temperatury wody T na różnych poziomach zbiornika instalacji pracującej w reżimie "low flow" (przeciętny dzień lipca)

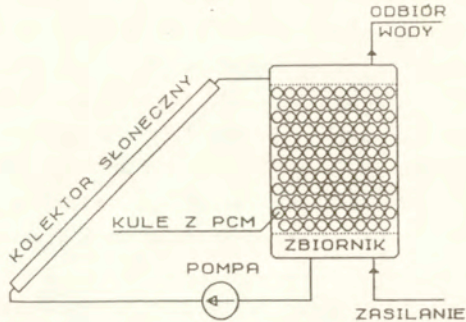


Rys. 3 Osiągi (patrz rys. 2) klasycznej instalacji CWU przy wydatku 30 kg/h wody na 1 m² powierzchni absorbera

wydatku 6 kg/h m^2 absorbera, drugiej zaś (rys.3) z przepływem normalnie stosowanym, pięciokrotnie większym. Prawe strony rysunków ilustrują narastanie temperatury w zbiornikach akumulacyjnych na pięciu równoodległych poziomach wzdłuż wysokości zbiornika. Układ z dużą prędkością przepływu magazynuje większą ilość energii w ciągu dnia, jednak wartości maksymalne temperatury w zbiorniku tego układu są niższe, a 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 powodujących jej nierównomierną dystrybucję w przekroju dobowym. W takim przypadku jej temperatura może ulegać dużym zmianom wskutek mieszania się wody w zbiorniku, co jest zjawiskiem niekorzystnym powodującym zwiększenie poboru mocy ze źródeł innych niż energia promieniowania słonecznego (np. grzanie elektryczne). Zmieniająca się w ciągu doby temperatura czynnika w obiegu kolektorowym instalacji powoduje również niekorzystne wahania temperatury ciepłej wody użytkowej w zbiorniku wykorzystującym tylko magazynowanie przy zmianie entalpii wody. Dlatego proponuje się zastosowanie w klasycznym magazynującym zbiorniku wodnym dodatkowych elementów magazynujących ciepło z wykorzystaniem ciepła przemian fazowych (w skrócie PCM - Phase Change Materials) [3]. W prezentowanej pracy rozważano wpływ na pracę instalacji elementów magazynujących w postaci złoża kulistego wypełniającego część objętości zbiornika akumulacyjnego. W dalszych rozważaniach przewiduje się przeprowadzenie analizy dla innych kształtów elementów z PCM, w szczególności - pionowych prętów.

Magazynowanie z równoczesnym wykorzystaniem pojemności cieplnej jednego czynnika i ciepła przemiany fazowej drugiego, wydaje się być sposobem bardzo 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



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

optymalne wykorzystanie energii z kolektorów słonecznych.

Schemat ideowy proponowanej konstrukcji zbiornika akumulującego przedstawiono na rysunku 4. Zbiornik akumulacyjny lub jego górna część wypełniona jest cienkościennymi kulkami z polietylenu zawierającymi materiał PCM i szczelnie zamkniętymi. Materiały stosowane w niskotemperaturowym magazynowaniu ciepła (np. woski) są nieznacznie lżejsze od wody ($\rho \approx 900 - 940 \text{ kg/m}^3$) 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 rurowych. 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 być korzystniejsza z uwagi na łatwość regulacji stosunku pojemności cieplnej materiału PCM do całkowitej pojemności cieplnej zbiornika. Konstrukcja taka umożliwi ponad to występowanie korzystnego z punktu widzenia eksploatacji instalacji, zjawiska znanego w literaturze jako "plume entrainment" [10] i polegającego na kanałowym przepływie przez górną gorącą strefę zbiornika akumulacyjnego (bez jej zaburzania) chłodniejszej wody z kolektora do strefy zbiornika z taką samą gęstością (temperaturą) wody. Zjawisko to zwiększa stra-

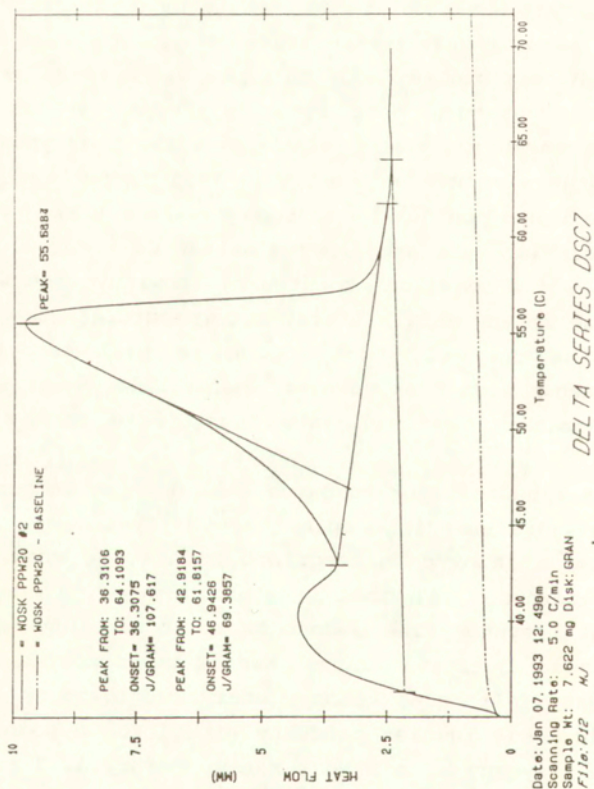
tyfikację termiczną w zbiorniku.

2. Materiały PCM perspektywnie możliwe do wykorzystania w słonecznych instalacjach ciepłej wody użytkowej i przewidywany wpływ ich umieszczenia w zbiorniku na charakterystyki instalacji.

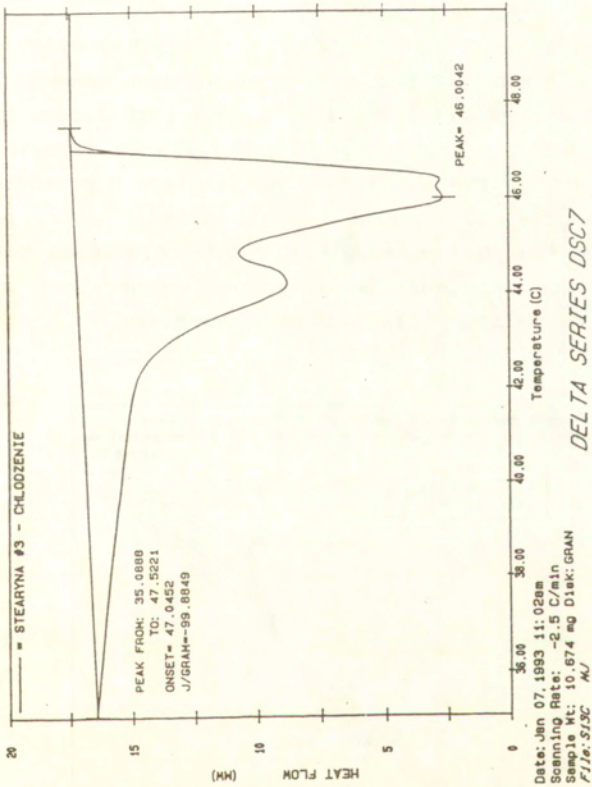
Woda wykorzystywana do celów sanitarnych bezpośrednio przed użyciem ma z reguły temperaturę w granicach 40°C . W przypadku gromadzenia ciepłej wody na zapas w zbiorniku akumulacyjnym, jej temperatura może być odpowiednio wyższa. Ze względów praktycznych nie jest jednak pożądane magazynowanie wody o temperaturze znacznie przekraczającej temperaturę jej wykorzystywania, gdyż pociąga to za sobą zawsze większe straty ciepłne do otoczenia. Substancje przewidziane do wykorzystania jako materiały PCM w omawianej konstrukcji powinny więc wykazywać największe zmiany entalpii wraz z temperaturą w zakresie temperatur od 40 do 55°C . Winny ponad to nie wchodzić w reakcje chemiczne z wodą, jak również nie posiadać właściwości toksycznych. Pożądana jest ich łatwa dostępność na rynku i niska cena.

Jak wynika z badań literaturowych [4], 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 - zawierają najczęściej estry wyższych kwasów tłuszczowych i alkoholi oraz kwasy, alkohole, ketony, eter, węglowodory i in. Do wosków zalicza się również produkty bitumiczne o podobnych właściwościach fizycznych, np. wosk ziemny, cerazyna. Z punktu widzenia 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 od 10 do 20°C .

Mając na uwadze budowę w przyszłości instalacji eksperymentalnej, a także konieczność oszacowania poprawności przed-



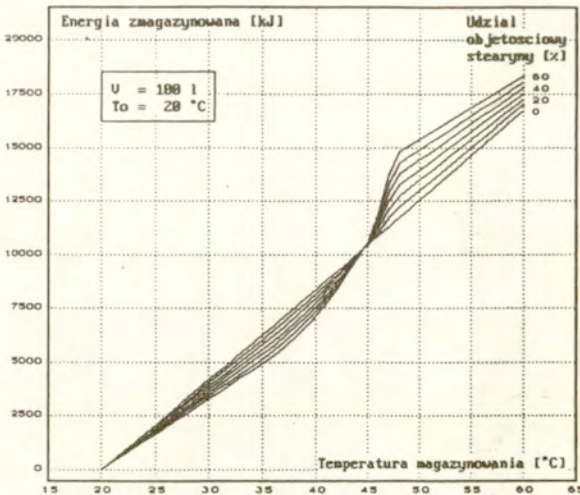
Rys.5 Diagram DSC obrazujący zmiany strumienia ciepła doprowadzanego w trakcie przemiany fazowej przy ogrzewaniu wosku PPW-20.



Rys. 6 Diagram DSC obrazujący zmiany strumienia ciepła odprowadzanego w trakcie przemiany fazowej przy schładzaniu ciekłej stearyny.

stawionego w niniejszym opracowaniu modelu matematycznego instalacji, przeprowadzono badania właściwości cieplnych kilku materiałów do magazynowania energii dostępnych na rynku krajowym [11]. Badania te pozwoliły na wyselekcjonowanie dwóch materiałów perspektywnie najlepiej spełniających warunki sformułowane na wstępie tego rozdziału. Są to: wosk o symbolu PPW-20 produkcji Zakładów Chemicznych Kędzierzyn - Kozle oraz stearyna.

Badania właściwości cieplnych wymienionych powyżej materiałów dokonano przy użyciu kalorymetru scanningowego DSC-7 firmy Perkin-Elmer. Rys.5 i 6 przedstawiają przykładowo typowe diagramy DSC uzyskane przy grzaniu wosku PPW-20 (rys.5) oraz chłodzeniu stearyny (rys.6). Krzywe na diagramach przedstawiają ciepło doprowadzane (lub odprowadzane) do/z próbki materiału przy stałym tempie grzania lub chłodzenia próbki. Pozwalają one na sporządzenie zależności funkcyjnej ciepła właściwego od temperatury dla badanego materiału.



Rys.7 Zmiana ilości zmagazynowanej energii w zależności od stopnia wypełnienia zbiornika materiałem PCM (stearyna) przy magazynowaniu od temperatury początkowej 20°C.

Zaletą przedstawianego na rys. 4 rozwiązania konstrukcyjnego jest duża pojemność cieplna zbiornika z dwoma mediami odniesiona do jednostki masy, niemal stała temperatura w jakiej następuje oddawanie i pobieranie ciepła (w zakresie przedziału temperatury w jakim zachodzi przemiana fazowa, dobieranego poprzez zastosowanie odpowiednich materiałów). Rys.7 ilustruje pojemność cieplną zbiornika akumulacyjnego o objętości 100 l w zależności od udziału objętości materiału PCM w całości przy magazynowaniu od temperatury początkowej 20°C. Obliczeń dokonano dla elementów kulistych wypełnionych woskiem PPW-20, którego parametry cieplne uzyskane z pomiarów kalorymetrem scanningowym przedstawiono na rys.6 [4]. Wosk ten ma "rozmytą" przemianę fazową w zakresie temperatur 33 - 60°C z maksimum w 55°C. W tym też zakresie jego pojemność cieplna na jednostkę masy jest większa niż wody. Z przedstawionego na rys.7 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.

W zastosowaniach praktycznych rzeczą nawet istotniejszą od pojemności cieplnej zbiornika akumulacyjnego są jego charakterystyki cieplno - przepływowe i ich wpływ na pracę całej instalacji, a w szczególności - na sprawność chwilową kolektorów słonecznych. Analiza tego wpływu możliwa jest, jedynie na drodze zmuśnych badań eksperymentalnych lub przy zastosowaniu metod symulacji numerycznej obejmujących reprezentatywny okres pracy instalacji. Na obecnym etapie zaawansowania pracy ukończono numeryczny model symulacyjny instalacji.

3. Model matematyczny instalacji ze zbiornikiem z dwoma mediami magazynującymi

Zgodnie z rys.4, słoneczna instalacja przygotowania ciepłej wody użytkowej złożona jest z dwóch zasadniczych elementów: kolektora energii promieniowania słonecznego i zbiornika magazynującego. Opis matematyczny pracy takiej instalacji zawierać więc powinien modele tych dwóch głównych elementów z

odpowiednimi warunkami sprzęgającymi, jak również uwzględniać oddziaływania otoczenia (promieniowanie słoneczne, temperatura otoczenia kolektorów) i 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:

$$(1) \quad Q_u = A_c F_R \left[(\tau\alpha)_b R_b H_b + (\tau\alpha)_d R_d H_d - U_L (T_{f1} - T_a) \right]$$

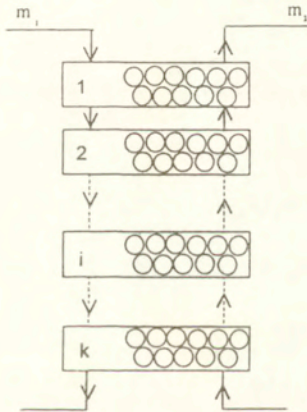
gdzie:

- A_c - powierzchnia absorbera kolektora słonecznego
 - F_R - współczynnik odprowadzenia ciepła z kolektora
 - $(\tau\alpha)$ - efektywny współczynnik transmisyjno - emisyjny
 - R - współczynnik przeliczeniowy gęstości strumienia promieniowania z płaszczyzny poziomej na pochyloną
 - H - gęstość strumienia promieniowania słonecznego
 - U_L - łączny współczynnik strat ciepła do otoczenia
 - T_{f1} - temperatura czynnika na wlocie do kolektora
 - T_a - temperatura otoczenia
- Indeksy "b" oraz "d" oznaczają odpowiednio promieniowanie bezpośrednie i rozproszone (dyfuzyjne).

Wartości F_R , $(\tau\alpha)$, R_b , R_d oraz U_L są opisane odpowiednimi zależnościami funkcyjnymi cytowanymi w literaturze [1,6]. Wartości gęstości strumienia promieniowania H 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 [5].

Przyjęty model matematyczny zbiornika magazynującego jest zmodyfikowanym modelem strefowym z kontrolowanym poziomem wlotu do strefy (woda wpływająca z kolektora do zbiornika zajmuje

bezpośrednio miejsce w strefie zbiornika z lokalną gęstością wody najbliższą gęstości wody opuszczającej kolektor) [8], [9]. Uwzględniono w nim zjawisko stratyfikacji termicznej w zbiorniku, wymianę ciepła pomiędzy wodą a elementami z PCM oraz straty ciepła do otoczenia przez ścianki zewnętrzne. Ponieważ wymiana ciepła pomiędzy wodą, a kulami z PCM determinowana jest 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.8 Podział zbiornika akumulacyjnego na strefy.

Równanie, będące bilansem energetycznym wody wypełniającej strefę "i" (a ściślej rzecz biorąc - wody przepływającej przez tę strefę), zgodnie z oznaczeniami z rys.8 przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}
 V_i \rho c_p \frac{dT_i}{dt} &= \gamma_i c_p m_1 (T_{i-1}^* - T_i) + c_p m_2 (T_{i+1} - T_i) + \\
 (2) \quad &+ \alpha n_i F_n \left(T_{\text{ml}} \Big|_{r=r_n} - T_i \right) + U_s F_{s1} (T_{\text{as}} - T_i) \\
 & \quad i \in \langle 1, k \rangle
 \end{aligned}$$

Gwiazdka * przy temperaturze T_{i-1} oznacza jej specjalne traktowanie w modelu zbiornika. Dla strefy najwyższej $i = 1$ (rys.8), temperatura ta jest równa temperaturze wody opuszczającej kolektor T_{k2} przy spełnieniu warunku, że $T_{k2} > T_1$. Wówczas współczynniki γ_i 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 dla $k-1$, lecz wyższa od T_k , wówczas w równaniu dla strefy k temperatura T_{k-1} przyjmowana jest jako T_{k2} , zaś dla wszystkich stref leżących powyżej współczynniki γ_i równe są 0.

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

$$(3) \quad c_{pm}(T_{m1}(t)) \rho_m(T_{m1}(t)) \frac{\partial T_{m1}}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_{m1} \frac{\partial T_{m1}}{\partial r} \right)$$

$i \in \langle 1, k \rangle$

poprzez warunki:

$$(4) \quad \alpha F_n \left(T_{m1} \Big|_{r=r_n} - T_1 \right) = - \lambda_m \frac{\partial T_{m1}}{\partial r} \Big|_{r=r_n}$$

W równaniach (2)-(4) przyjęto następujące oznaczenia:

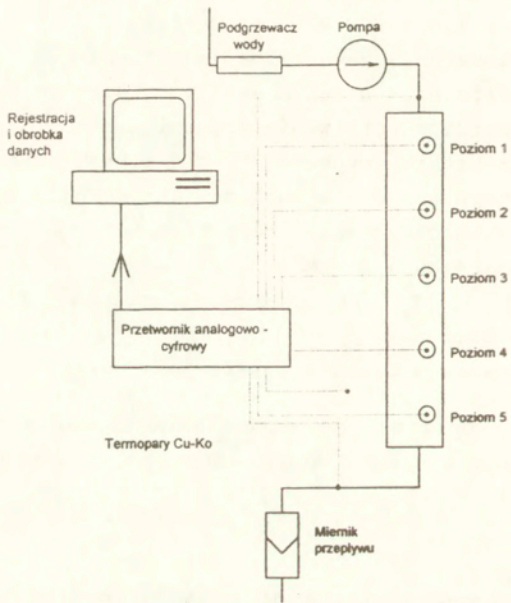
- α - współczynnik przejmowania ciepła pomiędzy kulami PCM, a wodą wypełniającą przestrzeń pomiędzy kulami
- γ_i - współczynnik przyjmujący wartości 0 lub 1 zależnie od tego, czy występuje dany rodzaj przepływu w i -tej strefie zbiornika
- V_i - objętość wody wypełniającej i -tą strefę
- ρ - gęstość wody
- c_p - ciepło właściwe wody
- m_1 - wydatek wody w pętli kolektora (wpływającej do zbiornika z kolektora i wypływającej ze zbiornika do kolektora)

- m_2 - wydatek ciepłej wody pobieranej przez użytkownika
- T_i - średnia temperatura wody w i -tej sekcji
- n_i - ilość kul z PCM w i -tej sekcji
- F_n - powierzchnia zewnętrzna jednej kuli
- U_s - współczynnik strat ciepła zbiornika do otoczenia
- T_{as} - temperatura otoczenia zbiornika akumulacyjnego
- F_{si} - powierzchnia zewnętrzna i -tej sekcji zbiornika
- T_{mi} - temperatura PCM w kulach i -tej sekcji zbiornika
- λ_m - przewodność cieplna materiału PCM
- r_n - promień kuli z PCM
- $c_{pm}(T_{mi}(t)), \rho_m(T_{mi}(t))$ - funkcje ciepła właściwego i gęstości materiału PCM zależne od temperatury T_{mi} budowane w trakcie rozwiązania równania (3) [7]

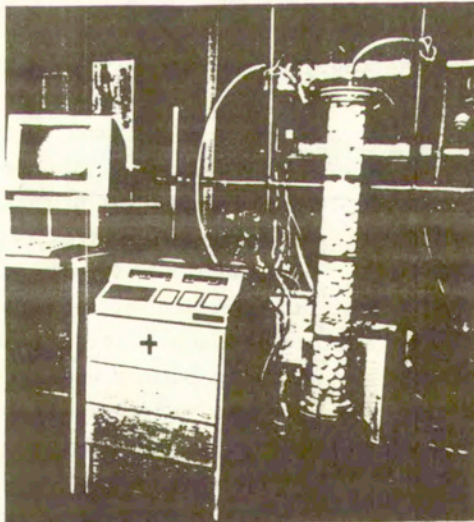
Szczegółowy opis metody rozwiązania równania niestabilnego przewodzenia ciepła z równoczesną przemianą fazową zamieszczono w [7].

4. Stanowisko eksperymentalne do badań zbiornika i przebieg badań

Do weryfikacji przedstawionego powyżej modelu matematycznego zbiornika zbudowano proste stanowisko badawcze, którego schemat ideowy pokazany jest na rys.9 i 10. W skład stanowiska wchodzi zbiornik z plexiglasu o wysokości 1 m i średnicy wewnętrznej 105 mm. We wnętrzu zbiornika umieszczono 171 piłeczek ping-pongowych o średnicy 38 mm wypełnionych stearyną, zajmujących 48,2 % objętości zbiornika ($4,175 \text{ dcm}^3$). W pięciu elementach magazynujących, umieszczonych w środku pięciu równych objętościowo sekcjach zbiornika, zainstalowano termopary Cu-Ko ze złączami termopar 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.



Rys.9 Schemat stanowiska eksperymentalnego.



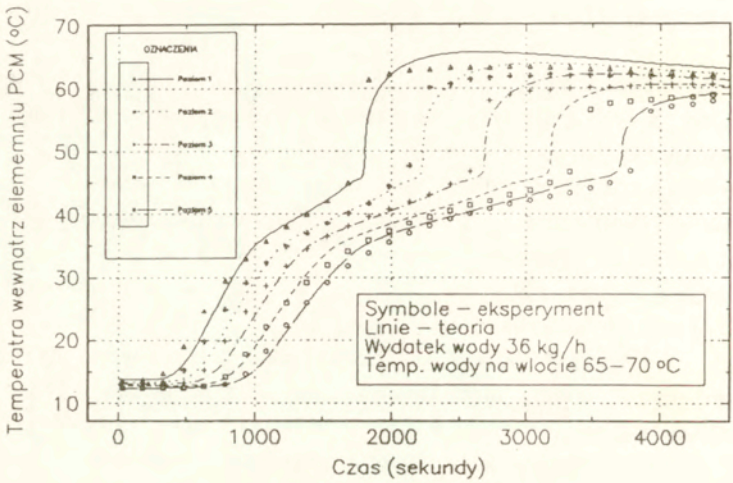
Rys.10 Widok stanowiska eksperymentalnego

Woda zasilająca zbiornik podgrzewana była do wymaganego poziomu temperatury (tylko w trakcie symulacji ładowania zbiornika) w przepływowym podgrzewaczu elektrycznym. Wydatek wody przepływającej przez zbiornik kontrolowany był rotametem.

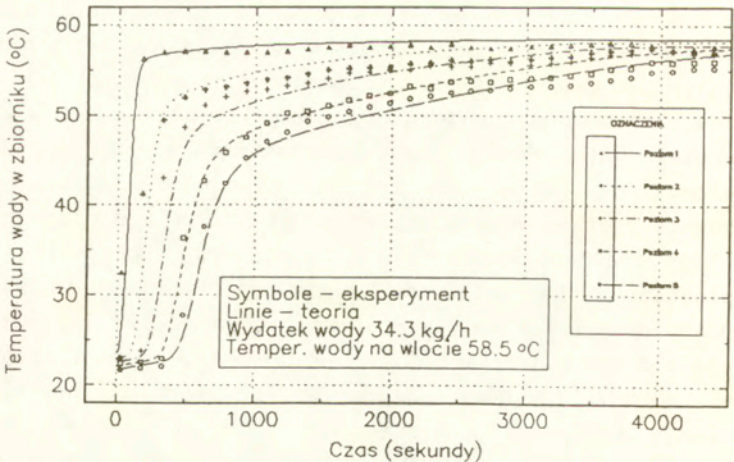
Przeprowadzono badania ładowania (gromadzenia energii cieplnej w zbiorniku) i rozładowania. W trakcie symulacji ładowania, zbiornik o niskiej początkowej temperaturze w całej swojej objętości, zasilany był od góry stałym wydatkiem wody o ustalonej temperaturze przewyższającej górną temperaturę zakresu przemiany fazowej stearyny. Wskazania wszystkich termopar rejestrowane były co 30 sek, aż do momentu osiągnięcia przez układ stanu równowagi termicznej. Pomiaru spadku temperatury wody przy przejściu przez zbiornik akumulacyjny po osiągnięciu stanu ustalonego po naładowaniu zbiornika pozwalały na oszacowanie współczynnika strat ciepłych zbiornika. Przy rozładowywaniu, przez zbiornik przepływała (wlot u góry) zimna woda z sieci wodociągowej ze stałym wydatkiem.

5. Wyniki badań eksperymentalnych - porównanie z obliczeniami teoretycznymi

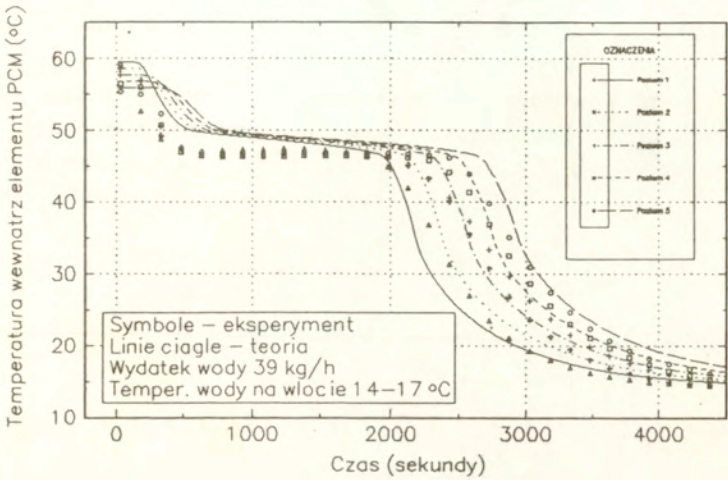
Rys. 11 - 14 przedstawiają porównanie wyników uzyskanych w trakcie badań eksperymentalnych z obliczeniami teoretycznymi wykonanymi z wykorzystaniem opisanego uprzednio modelu matematycznego zbiornika. Trzeba tu zaznaczyć, że stosowane w eksperymencie wydatki masowe wody przepływającej przez zbiornik w granicach od 30 do 39 kg/h, zapewniające siedmiokrotną całkowitą wymianę wody w zbiorniku (4.47 dcm^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 w eksperymencie wynikał z wykorzystania do regulacji wydatku i temperatury wody na wlocie do zbiornika układu zasilania będącego na wyposażeniu Laboratorium Energetyki Słonecznej i projektowane-



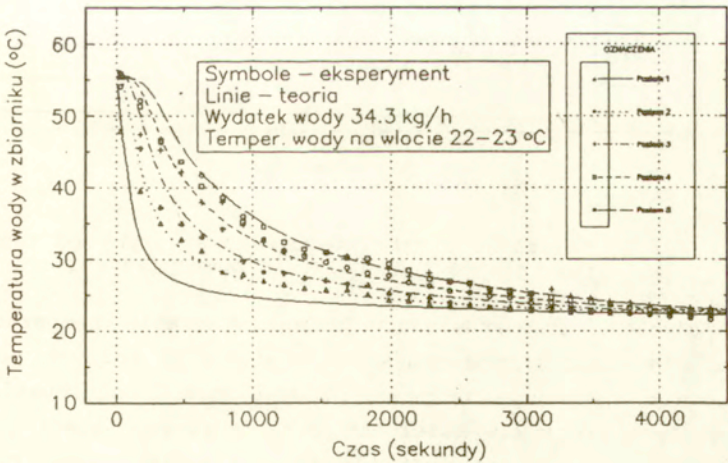
Rys.11 Zmiany temperatury środka elementów z PCM w trakcie ładowania zbiornika.



Rys.12 Zmiany temperatury wody z zbiorniku w trakcie jego ładowania.



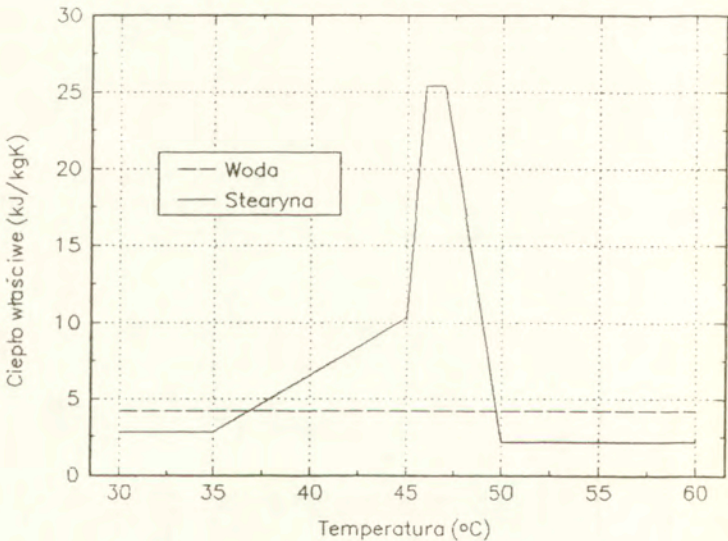
Rys.13 Zmiany temperatury środka elementów z PCM w trakcie rozładowania zbiornika.



Rys.14 Zmiany temperatury wody z zbiorniku w trakcie jego rozładowania.

go do obsługi pełnogabarytowych instalacji słonecznych.

Obliczenia teoretyczne zamieszczone na rys. 11 - 14 wykonano przy podziale zbiornika magazynującego na 5 sekcji. Przy ich realizacji przyjęto przybliżoną zależność ciepła właściwego stearyny od temperatury w postaci linii łamanej przedstawionej na rys.15 i opracowanej na podstawie badań kalorymetrycznych stearyny (patrz rys.6). Na tym samym rysunku 15 dla porównania linią przerywaną zaznaczono ciepło właściwe wody.



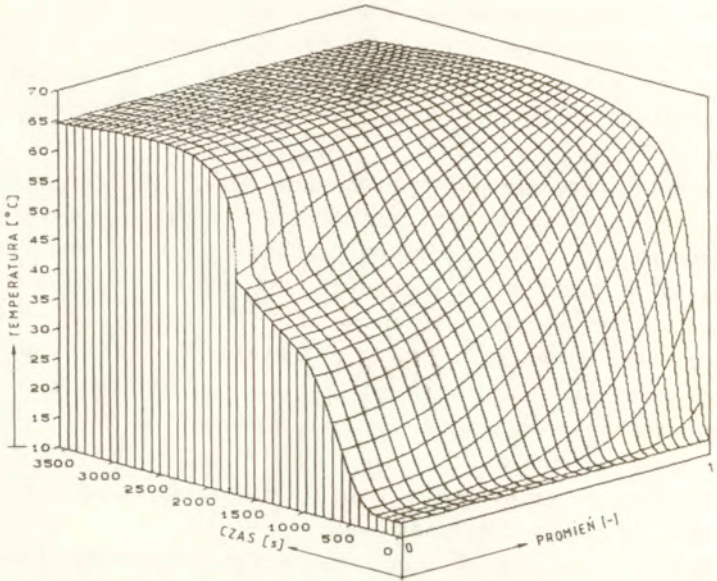
Rys.15 Zależność ciepła właściwego stearyny od temperatury przyjęta do obliczeń numerycznych.

Rys.11, przedstawiający zmiany w czasie temperatury w środku elementów magazynujących dla pięciu różnych poziomów 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

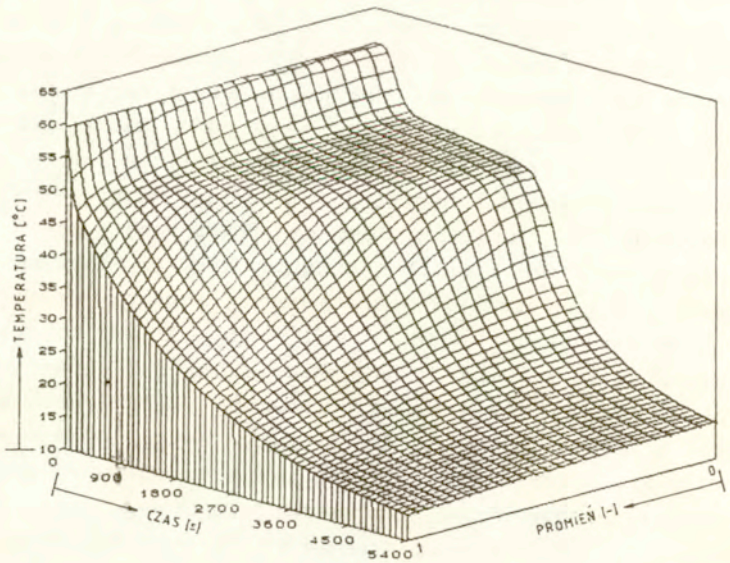
leżeć w fakcie, iż po całkowitym stopieniu się w materiale PCM występują prądy konwekcyjne prowadzące do szybkiego wyrównania się temperatury w całym elemencie, podczas gdy w obliczeniach teoretycznych założono transport energii tylko na drodze przewodzenia.

Rys.12 przedstawia 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 dla pomiarów temperatury w środku elementów z PCM, niewielkie różnice pomiędzy 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).

Rys.13 i 14 przedstawiają takie same zestawienie wyników obliczeń teoretycznych i eksperymentu jak omówione powyżej, ale dla procesu rozładowania zbiornika. Porównując przebiegi temperatury w środku elementów z PCM w trakcie ich nagrzewania (rys.11) oraz chłodzenia (rys.13) widać jakościowe różnice pomiędzy tymi procesami. O ile przy nagrzewaniu (ładowaniu) elementów ich temperatura w całym zakresie przemiany fazowej (35 - 47°C) narasta ze stałą w przybliżeniu prędkością (rys.11), o tyle przy rozładowaniu temperatura w centrum elementu pozostaje praktycznie stała przez cały okres zestalania się materiału PCM (rys.13). Jest to spowodowane zarówno faktem, że większa część ciepła przemiany fazowej stearyny jest oddawana (lub pobierana) w pobliżu górnej granicy temperaturowej przemiany fazowej (46 - 47°C, rys.6,15), jak również stwierdzonym w trakcie badań kalorymetrem DSC innym nieco kształtem krzywej z rys.6 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 usrednioną z przebiegów topnienia i krzepnięcia, rys.15. Stąd



Rys.16 Rozkłady temperatury wewnątrz elementu PCM w trakcie jego nagrzewania.



Rys.16 Rozkłady temperatury wewnątrz elementu PCM w trakcie jego chłodzenia.

też na rys.13 w symulacji numerycznej temperatura w centrum elementów łagodnie maleje w procesie krzepnięcia, podczas gdy w eksperymencie pozostaje praktycznie stała. Rys.16 i 17 przedstawiają typowe uzyskiwane w trakcie obliczeń symulacyjnych historie rozkładu temperatury w całej objętości elementu magazynującego dla najwyższej sekcji zbiornika podczas ich grzania i chłodzenia. Przebiegi temperatury leżące w płaszczyznach wyznaczonych przez osie czasu i temperatury dla $r=0$ są widoczne na rys.11 i 13.

Analizując wyniki eksperymentu chłodzenia można zauważyć rozbieżności pomiędzy obliczeniami teoretycznymi a eksperymentem dla najwyższego poziomu zbiornika, w szczególności dotyczące przebiegu temperatury wody (rys.14). Trudno w chwili obecnej w sposób jednoznaczny 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 możliwe zjawiska uboczne zaistniałe w trakcie eksperymentu (np. kanałowanie przepływu zimnej wody po wlocie do zbiornika w ten sposób, że termopara najwyższej sekcji znajduje się w enklawie o temperaturze wyższej, niż średnia temperatura sekcji). 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 w eksperymencie (z powodów czysto technicznych).

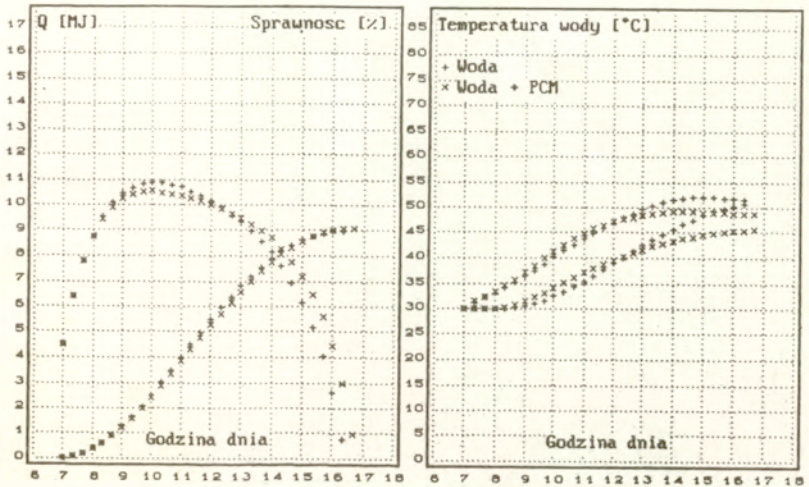
6. Wstępne wyniki obliczeń symulacyjnych pracy instalacji.

Eksperymenty przeprowadzone z modelem zbiornika akumulacyjnego z dwoma mediami magazynującymi potwierdzają poprawność zaproponowanego opisu matematycznego zbiornika w stopniu wystarczającym do wykorzystania tego opisu w symulacji numerycznej pracy całej instalacji słonecznej. Na obecnym etapie zaawansowania pracy została ukończona pierwsza seria obliczeń

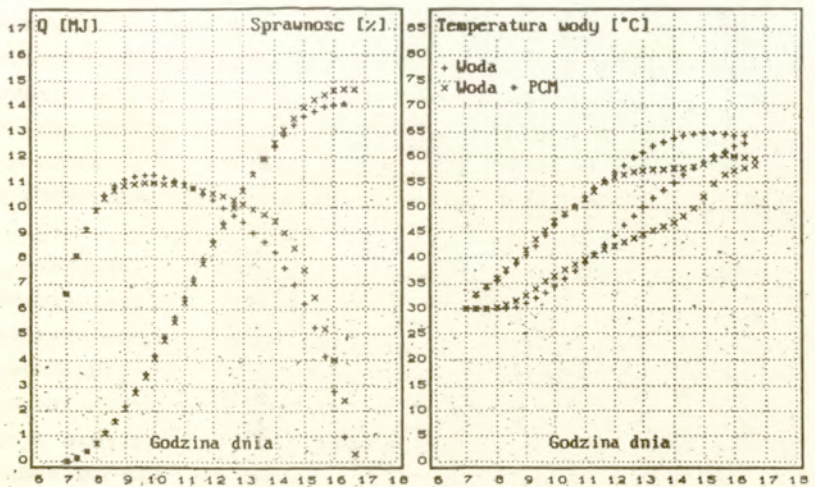
symulacyjnych, chwilowo jeszcze przy założeniu braku konsumpcji ciepłej wody przez użytkownika instalacji w trakcie gromadzenia energii. Uwzględnienie w obliczeniach symulacyjnych poboru wody ze zbiornika wymaga wcześniejszej analizy najbardziej prawdopodobnego dla warunków polskich dobowego rozkładu zużycia CWU.

Rysunki 18 - 20 przedstawiają przykładowe wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem podanego uprzednio modelu symulacyjnego instalacji. Każdy z tych rysunków zawiera porównanie pracy dwóch identycznych słonecznych 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 z całkowitym efektem cieplnym przemiany fazowej 160000 J/kg przy zmianie jej temperatury od 33 do 50 °C. W obu porównywanych instalacjach założono istnienie zbiornika magazynującego o stosunku wysokości do średnicy jak 2:1 oraz stosunku pojemności zbiornika do powierzchni kolektorów równej 67 litrów/m² powierzchni absorbera (kolektor słoneczny o powierzchni absorbera 1.5 m² i odpowiadający mu zbiornik magazynujący o pojemności 100 dm³). Lewy wykres każdego rysunku przedstawia zmienność chwilowych wartości sprawności kolektorów słonecznych oraz narastanie w czasie energii zakumulowanej w zbiorniku, prawy zaś zmiany temperatury czynnika w najwyższej i najniższej strefie zbiornika. W trakcie prowadzenia obliczeń symulacyjnych zbiornik podzielony był na 10 równych objętościowo stref.

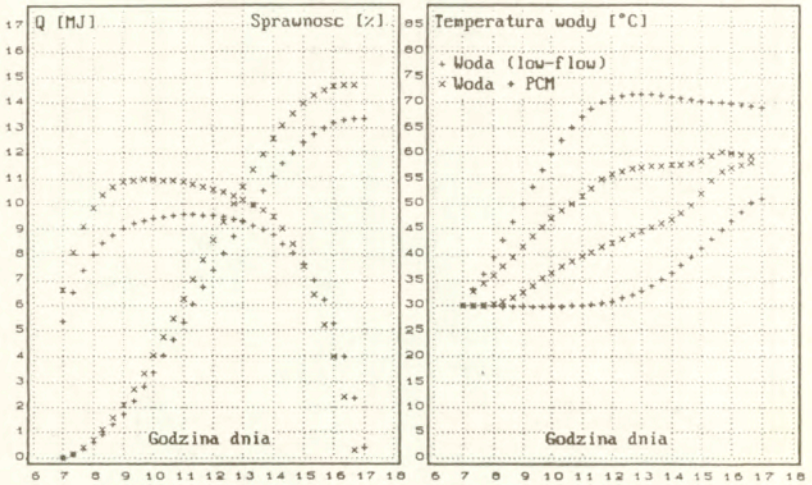
Obliczenia, których wyniki przedstawiono na rys.18 wykonano dla warunków zewnętrznych odpowiadających średnim wieloletnim wartościom danych meteorologicznych dla lipca w regionie Wielkopolsko - Mazowieckim (dzienna suma promieniowania na płaszczyznę kolektora 14572 kJ/m² przy jego pochyleniu względem poziomu pod kątem 45°, temperatura otoczenia zmienna w zakresie od 16°C przed wschodem słońca do 22.6°C we wczesnych godzinach popołudniowych [5,8]). Założono, że wydatki wody w petli kolektorów są identyczne w obu instalacjach i zapewniają pełną wymianę wody w zbiorniku wodnym w ciągu 2.5 godziny. Dla zbiornika z wypełnieniem PCM, z uwagi na to, że wo-



Rys.18 Porównanie osiągnięć instalacji tradycyjnej i proponowanej przy pracy w przeciętnym dniu lipca.



Rys.19 Porównanie osiągnięć instalacji tradycyjnej i proponowanej przy pracy w słonecznym dniu lipca.



Rys.20 Porównanie osiągnięć instalacji typu "low-flow" i proponowanej przy pracy w słonecznym dniu lipca.

da zajmuje 43.5 % objętości zbiornika, pełna wymiana wody nastąpi w czasie przeszło dwa razy krótszym. Przyjęto w obu instalacjach temperaturę początkową wody w godzinach porannych równą w całej objętości zbiornika 30 °C, co w sposób uproszczony modeluje kolejny dzień pracy instalacji w sekwencji wielodniowej. Różnice w osiągnięciach obu w/w instalacji, jak to wynika z rys.18, są niewielkie. Ilość nagromadzonej energii w zbiorniku 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 tej samej ilości energii zmagazynowanej.

Symulacja przeprowadzona dla tych samych parametrów

eksploatacyjnych instalacji (wydatki wody), ale dla dnia słonecznego (suma dzienna energii na powierzchnię kolektora 22000 kJ/m^2) uwypukla efekty umieszczenia elementów PCM w zbiorniku (rys.19). Krzywe narastania temperatury wody w zbiorniku mają tu zdecydowanie różny charakter dla obu rodzajów instalacji, przy czym instalacja z PCM przy niższej temperaturze wody w zbiorniku gromadzi w ciągu dnia większą ilość energii słonecznej osiągając tym samym wyższą średnią sprawność dzienną.

Interesujące wydaje się być porównanie osiągow instalacji z PCM i instalacji wodnej o tych samych gabarytach, ale pracującej w reżimie "low - flow" wspomnianym na początku niniejszego opracowania. Rys.20 przedstawia takie porównanie otrzymane dla symulacji w dniu słonecznym i wydatku wody w instalacji "low - flow" równym 8 kg/h/m^2 powierzchni absorbera. W tym przypadku zaznacza się wyraźna przewaga proponowanego rozwiązania technicznego. Instalacja z PCM przez cały dzień pracuje z większymi sprawnościami osiąganymi 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 ciepłne ze zbiornika i wyższa sprawność magazynowania w okresie nocnym i dni bezsłoneczne.

5. Podsumowanie

Przedstawiona w sposób ogólny koncepcja magazynu ciepła wymaga przeprowadzenia dalszej dokładnej analizy teoretycznej, która pozwoli określić jego przydatność w praktycznych zastosowaniach. Zamieszczone wyniki wstępnych analiz wpływu nowego rozwiązania konstrukcyjnego zbiornika na osiągi całej instalacji wydają się być 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 z punktu widze-

nia eksploatacyjnego 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 osiągi instalacji, jak również zachowanie się instalacji w trybie pracy ładowania zbiornika z równoczesną konsumpcją ciepłej wody przez użytkownika. Interesująca wydaje się być 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.

Praca stanowi fragment badań prowadzonych w ramach projektu badawczego Nr 9 9332 92 03 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

Literatura

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, Vol.16, No 4, 1992
3. M.Jaworski, J.Szypliński, R.Wnuk: "Zbiornik magazynujący energię cieplną". Proj. wyn. nr 456/90
4. R.Domanski, P.Bratkowski, T.Bułański, M.Jaworski, R.Wnuk: "Badanie własności cieplnych wybranych materiałów do magazynowania energii cieplnej oraz procesów wymiany ciepła przy ładowaniu i rozładowywaniu układu magazynującego", Raport ITC PW Nr 6.1.6.01 PR-8, 1985
5. K.Jaskólski: "Struktura promieniowania słonecznego w Polsce, jej zmiany w różnych miejscach kraju", Raport Instytutu Energetyki Nr 6.1.01.01.PR-8, 1981
6. B.Y.Liu, R.C.Jordan: "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation", Solar Energy, Vol. 4, No 3, 1960
7. Z.Pluta, R.Wnuk: "Modelowanie przemiany fazowej w magazynie energii słonecznej z kulistym złożem magazynującym", Prace IPPT PAN, 36/1993
8. R.Wnuk: "Numeryczne modelowanie aktywnego bezpośredniego systemu podgrzewu ciepłej wody użytkowej w wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego", Prace IPPT PAN, 38/1991
9. D.Wolf, A.N.Sembira, A.I.Kudish: "Dynamic Simulation and Parametric Sensitivity Studies on Central Solar Domestic Hot Water System", Energy, Vol.9, No 2, 1984
10. E.M.Kleinbach, W.A.Beckman, S.A.Klein: "Performance Study of One-Dimensional Models for Stratified Storage Tanks", Solar Energy, Vol.50, No.2, 1993
11. M.Jaworski: "Badania właściwości cieplnych materiałów do magazynowania energii", opracowanie wewnętrzne IPPT PAN, 1993, nie publikowane