**Jacek Sacharczuk**

**Modelowanie matematyczne instalacji słonecznej do przygotowania ciepłej wody użytkowej i ogrzewania powietrznego, z akumulacją ciepła**

# Streszczenie pracy

Praca poświęcona jest zagadnieniu magazynowania energii cieplnej, pozyskiwanej przez kolektory słoneczne w buforowym zasobniku ciepła, wykonanym w postaci bloku betonowego, o strukturze kanałowej. Elementy kamienne lub betonowe,
ze względu na dużą gęstość materiału, jego dostępność i możliwość wykorzystania znacznych objętości stwarzają duże możliwości akumulacji energii i wyrównaną jej dystrybucję do celów ogrzewania obiektu. Największym problemem jest sposób optymalnego dla celów grzewczych dostarczania i odbierania zmagazynowanej energii cieplnej. W literaturze opisywane jest szereg rozwiązań technicznych
w zakresie pozyskiwania i magazynowania energii słonecznej w elementach struktury budynku lub elementach o budowie kanałowej. W większości przypadków źródłem ciepła w takich systemach są słoneczne kolektory powietrzne (w tym również pełniące tę funkcję panele fotowoltaiczne).

W niniejszej pracy przeanalizowano działanie systemu, w którym energia słoneczna absorbowana jest przez kolektory cieczowe, zasadnicze magazynowanie ciepła odbywa się w zasobniku wodnym, stanowiącym źródło ciepłej wody użytkowej,
a nadwyżki ciepła przekazywane są do dodatkowego akumulatora betonowego wykorzystywanego do ogrzewania obiektu. System pozwala na pracę w wyższych temperaturach, w porównaniu z systemami, w których wykorzystywane jest powietrze podgrzewane w kolektorach powietrznych, a więc ma większe możliwości akumulacji ciepła. System taki w szczególności nadaje się do pracy w warunkach klimatycznych, w których występują duże zasoby dostępnej energii słonecznej i jednocześnie znaczne dobowe wahania temperatury. W warunkach polskich może sprawdzać się
w okresach przejściowych: wiosennym i jesiennym.

Ideą pracy było stworzenie prostego modelu matematycznego, nadającego się do prowadzenia ciągłych symulacji pracy systemu, a w szczególności procesów ładowania
i dynamicznego rozładowywania akumulatora betonowego o strukturze kanałowej. Biorąc pod uwagę konieczność wykonania weryfikacji doświadczalnej modelu, sporządzono go dla akumulatora wykonanego z dostępnych na rynku kształtek akumulacyjnych, z których możliwe jest tworzenie struktur kanałowych, nadających się do zabudowania, jako fragmenty ścian wewnętrznych, przestrzeni podpodłogowych lub wypełnionych przestrzeni nieużytkowych budynków. Kształtki takie umożliwiły wykonanie struktury dwukanałowej o wymiarach 2,24mx0,56mx0,28m. Średnica hydrauliczna pojedynczego kanału jest równa 177,9mm.

Model nieustalonego przewodzenia ciepła w strukturze akumulatora, zbudowano
w oparciu o bilansową metodę elementów skończonych BMES. Metoda ta pozwala na modelowanie nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych, przy użyciu stosunkowo prostego modelu numerycznego, możliwego do rozwiązania przy pomocy autorskiego programu obliczeniowego, przy relatywnie krótkim czasie obliczeń. Model zbudowano w oparciu o następujące założenia:

* akumulator zbudowany jest z dwóch ciągów złożonych z 8 segmentów każdy, tworzących strukturą kanałową o przekroju charakteryzującym się podwójną symetrią;
* wynikający z symetrii przekroju powtarzalny element stanowi 1/8 przekroju kształtki akumulacyjnej;
* właściwości cieplne materiału akumulacyjnego w przyjętych warunkach pracy (pojemność cieplna właściwa i współczynnik przewodzenia ciepła) nie zależą od temperatury ani kierunku;
* brak gradientu temperatury w kierunku prostopadłym do osi symetrii przekroju;
* współczynnik wnikania ciepła, występujący w warunku brzegowym zadanym na wewnętrznej powierzchni kanału powietrznego, obliczany jest przy użyciu zmodyfikowanej korelacji Gnielińskiego;
* na zewnętrznej powierzchni segmentów akumulacyjnych, od strony izolacji zadany jest warunek brzegowy II rodzaju, a gęstość strumienia ciepła przepływającego do izolacji wyznaczana jest na podstawie pomiaru;
* bilans energii dla przepływającego w kanale powietrza uwzględnia jego pojemność cieplną;
* temperatura powietrza zmienia się w kierunku jego przepływu, a w danym przekroju poprzecznym jest stała;
* temperatura wlotowa powietrza do akumulatora wyznaczana jest przy pomocy oddzielnego modułu obliczeniowego, zawierającego numeryczny model wymiennika ciepła woda-powietrze.

W opracowanym programie obliczeniowym, napisanym w języku FORTRAN, możliwe jest prowadzenie symulacji działania instalacji złożonej ze źródła ciepła, wymiennika woda-powietrze oraz akumulatora betonowego. Jako źródło ciepła może być zdefiniowana instalacja solarna (uproszczony model zakładający bezpośredni obieg wodny, pełne wymieszanie wody w zasobniku oraz brak strat ciepła z układu rurociągów), pracująca w warunkach meteorologicznych określanych na podstawie danych typowego roku meteorologicznego lub źródło ze zmieniającą się w czasie temperaturą zasilania. W programie wykorzystano model obliczeniowy wymiennika lamelowego autorstwa D. Talera po modyfikacjach, dostosowujących go do zastosowanej na stanowisku doświadczalnym konstrukcji wymiennika oraz uwzględnieniu przepływów wody grzewczej, w zakresie ruchu laminarnego
i przejściowego, których pierwotny model nie obejmował.

W pracy przedstawiono kilka przykładowych przebiegów ładowania i rozładowywania akumulatora, które posłużyły do weryfikacji doświadczalnej zbudowanego modelu matematycznego, na podstawie pomiarów wykonanych na stanowisku laboratoryjnym.
W skład stanowiska wykonanego w laboratorium Instytutu Inżynierii Cieplnej
i Ochrony Powietrza Politechniki Krakowskiej wchodziły: betonowy akumulator wykonany z 16 modułów CMA, ułożonych w dwóch równoległych ciągach,
w izolowanej obudowie oraz układ przewodów zapewniających obieg powietrza, które ogrzewane było wymiennikiem lamelowym. Wymiennik lamelowy zasilany był wodą grzewczą z zasobnika o pojemności 200dm3, ogrzewanego kotłem gazowym oraz grzałką elektryczną, z możliwością połączenia z kolektorem słonecznym.

W trakcie pomiarów badano proces nagrzewania i dynamicznego rozładowywania akumulatora, poprzez pomiary temperatur i przepływów mediów oraz porównywanie ich z wynikami symulacji. Pomiary wykonywano w różnych warunkach: przy zróżnicowanych temperaturach zasilania wymiennika, przepływach powietrza obiegowego oraz zróżnicowanych schematach zmian temperatury wody zasilającej.

Przeprowadzone pomiary wykazały dobrą zgodność z modelowanymi przebiegami teoretycznymi, przy czym niezbędne okazało się wprowadzenie do modelu składników bilansu ciepła, opisujących straty ciepła przez izolowaną obudowę akumulatora. W przypadku nagrzewania wystarczające okazało się wykorzystanie wyników pomiaru gęstości strumienia ciepła na granicy materiału akumulatora
i izolacji, natomiast w przypadku chłodzenia konieczne było wprowadzenie doświadczalnie wyznaczonego współczynnika, określającego straty ciepła modelu, na podstawie reprezentatywnej temperatury masy akumulacyjnej oraz temperatury powietrza otaczającego akumulator.

Poza badaniami doświadczalnymi wykonano obliczenia porównawcze rozkładu temperatury w warunkach nieustalonego dwuwymiarowego przewodzenia ciepła
w powtarzalnym elemencie przekroju akumulatora (wykorzystywanym w obliczeniach całościowych). Porównano przebieg nagrzewania przekroju uzyskany przy pomocy zaproponowanego modelu (16 węzłowa siatka z komórkami trójkątnymi i rozwiązanie metodą BMES z wykorzystaniem arkusza Excel) oraz modelu z siatką złożoną
ze 157 węzłów z komórkami prostokątnymi, z rozwiązaniem klasyczną metodą MES (program napisany w Fortranie) oraz przebieg uzyskany przy pomocy oprogramowania CFD (Ansys Fluent) z automatycznie dobraną siatką złożoną
z 46617 węzłów z komórkami prostokątnymi.W wyniku przeprowadzenia obliczeń porównawczych, uzyskano prawie idealną zgodność symulacji CFD i BMES, przy czym czas obliczeń przebiegu trwającego 12h w przypadku metody BMES wyniósł kilka sekund podczas gdy w symulacji CFD 63 godziny.