

Gliwice, 30.03.2016 r.

dr hab. inż. Małgorzata Hanuszkiewicz-Drapała
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Techniki Ciepłej
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
tel. 32 2372051
e-mail: malgorzata.hanuszkiewicz-drapala@polsl.pl

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Jacka Sacharczuka

pt. „Modelowanie matematyczne instalacji słonecznej do przygotowania ciepłej wody użytkowej i ogrzewania powietrznego, z akumulacją ciepła”

1. Formalna podstawa recenzji

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest Uchwała Rady Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej z dnia 27.01.2016 r. oraz pismo Dziekana Wydziału prof. dr hab. inż. Elżbiety Nachlik z dnia 28.01.2016 r. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Dawid Taler, prof. Politechniki Krakowskiej.

2. Formalna charakterystyka pracy

Pracę doktorską zawierającą 175 stron podzielono na 9 rozdziałów i uzupełniono o dwa załączniki. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki pracy, w rozdziale drugim przedstawiono cel i zakres pracy. Merytoryczną część rozprawy zawarto w rozdziałach 4-8, podsumowanie i wnioski przedstawiono zaś w rozdz.9. Bibliografia obejmuje 59 pozycji. W załącznikach zamieszczono równania modelu matematycznego akumulatora ciepła oraz porównanie wyników pomiarów i obliczeń.

3. Ocena tematyki badawczej pracy doktorskiej

Celem recenzowanej pracy doktorskiej jest opracowanie modelu matematycznego a następnie programu komputerowego układu składającego się z kolektorów słonecznych, zasobnika wodnego, wymiennika ciepła ciecz-powietrze oraz akumulatora ciepła wykonanego z betonu. Rozważany układ może służyć do podgrzewania wody użytkowej w zasobniku wodnym oraz do ogrzewania pomieszczeń. Druga z tych funkcji jest realizowana za pośrednictwem powietrza przy wykorzystaniu betonowego akumulatora ciepła. Ciepło dostarczane jest do akumulatora przez przepływające kanałami powietrze podgrzane

uprzednio przy wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego w układzie urządzeń: kolektor słoneczny - zasobnik wodny, wymiennik ciepła powietrze-ciecz. Zastosowane rozwiązanie pozwala akumulować energię słoneczną docierającą do kolektora i wykorzystywać ją na potrzeby grzewcze w cyklach dobowych. Autor wspomina o możliwości wykorzystania takiego rozwiązania w okresach przejściowych, np. wczesnowiosennym, gdy w polskich warunkach klimatycznych konieczne jest jeszcze ogrzewanie pomieszczeń a równocześnie natężenie promieniowania słonecznego jest wystarczające, aby działały urządzenia solarne. Podjęta w pracy tematyka jest bardzo aktualna z uwagi na coraz powszechniejsze energetyczne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, w tym także energii promieniowania słonecznego. Zastosowanie układów solarnych przynosi efekt w postaci zmniejszenia zużycia paliw kopalnych i obniżenia bezpośredniej emisji substancji szkodliwych. Energia promieniowania słonecznego pozyskiwana w układach kolektorów słonecznych jest obecnie w Polsce głównie wykorzystywana na potrzeby podgrzewania wody użytkowej. Z uwagi na wartości temperatury powietrza podgrzanego w betonowym akumulatorze, zaproponowana koncepcja mogłoby znaleźć zastosowanie jako element układów grzewczych budynków. Opracowany w ramach pracy program komputerowy, bazujący na prostych metodach modelowania matematycznego i umożliwiający przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych rozważanego hybrydowego systemu solarnego w relatywnie krótkim czasie mógłby zostać wykorzystany w analizach tego typu układów grzewczych, w tym także w obliczeniach optymalizacyjnych.

4. Szczegółowa charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska ma charakter obliczeniowo – pomiarowy. W pracy przedstawiono koncepcję układu solarnego z zasobnikiem wodnym i akumulatorem betonowym oraz opracowano model matematyczny wspomnianego układu, jak również program obliczeniowy. Autor postawił następującą tezę: *„Przy pomocy prostych metod modelowania matematycznego możliwe jest prowadzenie symulacji działania hybrydowego systemu ogrzewania słonecznego, opartego o pomocnicze magazynowanie ciepła w akumulatorze betonowym o strukturze kanalowej”*. Zakres pracy jest obszerny – obejmuje ponadto wykonanie stanowiska badawczego i pomiarową weryfikację modelu matematycznego oraz symulacje numeryczne funkcjonowania układu przy założonych parametrach meteorologicznych. Cel pracy, tezę i zakres pracy doktorskiej przedstawiono w czytelny sposób w rozdziale drugim.

W rozdziale 3 Autor zamieścił schemat i opis zaproponowanego hybrydowego układu solarnego, który służy do podgrzewania wody użytkowej i ma zdolność akumulacji nadwyżki energii poprzez zastosowanie betonowego akumulatora ciepła.

Rozdział 4 zawiera opis modelu matematycznego rozważanej instalacji. Autor przedstawił kolejno opis matematyczny nieustalonych procesów zachodzących w poszczególnych elementach układu. W podrozdziałach 4.1 – 4.4 przedstawiono model matematyczny akumulatora ciepła. Modelowanie nieustalonego rozkładu temperatury w betonowym akumulatorze, zbudowanym z betonowych kształtek oparto na bilansowej metodzie elementów skończonych BMES (ang. Control Volume Based Finite Element Method) w

układzie dwuwymiarowym. Rozważano fragment, stanowiący powtarzalny element przekroju poprzecznego betonowej kształtki. W p.4.3 porównano rozkłady temperatury w takim elemencie uzyskane przy wykorzystaniu zastosowanej metody z analogicznymi wynikami otrzymanymi m.in. przy wykorzystaniu programu ANSYS Fluent. W rozważanym przypadku przewagą zastosowanej metody był zdecydowanie krótszy czas obliczeń.

W rozdziale 4.4 przedstawiono kompleksowy model matematyczny akumulatora oparty na różnicowym podziale tego urządzenia wzdłuż drogi przepływu powietrza, przy uwzględnieniu zmienności współczynnika wnikania ciepła. Takie podejście wymaga wyznaczania rozkładu temperatury w akumulatorze jedynie w wybranych przekrojach wynikających ze wspomnianego podziału różnicowego.

W rozdz. 4.5 zaprezentowano model matematyczny kolektora słonecznego i wodnego zasobnika ciepła, jak również metody wyznaczania natężenia promieniowania słonecznego. Porównano ponadto wyniki obliczeń otrzymane przy wykorzystaniu różnych modeli promieniowania słonecznego z danymi dla typowego roku meteorologicznego.

Rozdz. 5 zawiera opis programu komputerowego napisanego w języku Fortran, który bazuje na modelu matematycznym układu opisanym w rozdz. 4. W rozdziale tym zamieszczono ponadto informacje na temat danych do obliczeń i dodatkowego programu do obliczeń wymiennika ciepła powietrze – ciecz.

W rozdz. 6 przedstawiono wyniki wariantowych symulacji numerycznych akumulatora ciepła. Obliczenia wykonano dla różnych wartości prędkości powietrza przy dopływie do kanału akumulatora i zadanej temperaturze, badając jak zmienia się średnia temperatura masy akumulatora i energia w nim zakumulowana w cyklach ładowania i rozładowania. Analizowano ponadto możliwości wydłużenia czasu rozładowania akumulatora poprzez sterowanie strumieniem objętości powietrza. W p. 6.3 przedstawiono rezultaty obliczeń hybrydowego układu solarne dla wybranego dnia (15.04) typowego roku meteorologicznego dla Krakowa. Zbadano zmienność energii zakumulowanej w akumulatorach ciepła: betonowym i wodnym oraz zmienności średnich temperatur betonu i wody w 12-sto godzinnym cyklu ładowania.

Weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego (rozdz. 7) została zrealizowana na stanowisku laboratoryjnym zbudowanym przez Autora w Instytucie Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza Politechniki Krakowskiej. Stanowisko to składa się z betonowego akumulatora ciepła, wymiennika ciepła woda – powietrze, układu doprowadzania powietrza, układu zasilania w ciepłą wodę i systemu pomiarowego. Weryfikacji poddano model matematyczny wymiennika ciepła powietrze-woda i model matematyczny betonowego akumulatora ciepła. W przypadku pierwszym porównywano obliczone i zmierzone chwilowe wartości temperatury zarówno wody jak i powietrza przy wypływie z wymiennika, a także wartości strumieni ciepła przekazywanego w wymienniku będące efektem wyników pomiarów i obliczeń. Uzyskano dobrą zgodność. Weryfikację modelu matematycznego akumulatora przeprowadzono poprzez porównanie wyliczonych i wynikających z pomiaru wartości temperatury w wybranych punktach akumulatora ciepła, jak również wartości strumieni ciepła przekazywanego w urządzeniu. W tym przypadku uzyskano rozbieżności wartości wyznaczanych w oparciu o model matematyczny i wynikających z pomiarów. Autor wykazuje, że przyczyną tego jest przyjęcie w modelu matematycznym założenia dotyczącego

idealnej izolacji cieplnej akumulatora. Weryfikację modelu przeprowadzono dla kilkunastu wielogodzinnych cykli ładowania akumulatora przy zróżnicowanych warunkach wnikania ciepła od powietrza do ścianek kanału. Analogiczne badania przeprowadzono dla pełnego cyklu działania akumulatora, tj. jego ładowania i rozładowania.

W rozdz. 9 Autor zawarł podsumowanie pracy i zaprezentował najistotniejsze wnioski.

5. Ocena sposobu rozwiązania zagadnienia naukowego

Autor rozprawy postawił sobie zadanie opracowania modelu matematycznego układu solarnego służącego do podgrzewania wody użytkowej i ogrzewania pomieszczeń. Na podstawie modelu matematycznego został opracowany program komputerowy, który posłużył do przeprowadzenia wariantowych obliczeń. Kolejnym etapem była doświadczalna weryfikacja modelu matematycznego.

W zaproponowanej przez Autora koncepcji instalacji solarnej ogrzewanie pomieszczeń jest realizowane przy wykorzystaniu betonowego akumulatora ciepła, który jest cyklicznie nagrzewany i chłodzony przez powietrze przepływające przez kanały akumulatora. Źródłem ciepła jest woda podgrzana w zasobniku zasilanym płynem podgrzanym w kolektorach słonecznych. Przedstawiona koncepcja jest interesująca z uwagi na rozszerzenie możliwości klasycznego układu solarnego, służącego wyłącznie do podgrzewania wody użytkowej. Zastosowanie dodatkowych urządzeń, tj. wymiennika ciepła powietrze-ciecz i betonowego akumulatora ciepła umożliwia dodatkową akumulację energii i wykorzystanie jej do ogrzewania pomieszczeń. Taka postać akumulatora ciepła mogłaby umożliwić wkomponowanie tego elementu w strukturę budynku.

W przypadku zastosowania zaproponowanego rozwiązania konieczna jest znajomość przebiegu złożonych, nieustalonych procesów zachodzących w poszczególnych elementach układu, przy uwzględnieniu zmiennych parametrów otoczenia: natężenia promieniowania słonecznego i temperatury powietrza. Autor rozprawy zaproponował opis matematyczny tych procesów przyjmując pewne założenia upraszczające oraz opracował program komputerowy, który umożliwia przeprowadzanie symulacji obejmujących długie okresy funkcjonowania układu w relatywnie krótkim czasie. Czas obliczeń ma tutaj bardzo istotne znaczenie, gdyż symulacje obliczeniowe mogą w tym przypadku dotyczyć kilkumiesięcznych okresów działania układu.

Istotnym elementem modelu układu, decydującym o czasie obliczeń jest model matematyczny betonowego akumulatora ciepła. Opis procesu nieustalonego przepływu ciepła w tym elemencie układu generalnie ma złożony charakter. W pracy przedstawiono model oparty na bilansowej metodzie elementów skończonych, opracowany przy szeregu założeń upraszczających. Rozkłady temperatury wyznaczane są jedynie w pewnych przekrojach poprzecznych akumulatora związanych z różnicowym podziałem urządzenia wzdłuż drogi przepływu powietrza. Poprawność tak wyznaczanego dwuwymiarowego pola temperatury oceniono m.in. poprzez porównanie z wynikami obliczeń uzyskanymi przy wykorzystaniu programu ANSYS Fluent. Autor rozprawy zaproponował uproszczony sposób analizy przepływu powietrza przez kanał akumulatora m.in. poprzez przyjęcie wspomnianego

podziału różnicowego i wyznaczanie lokalnych wartości współczynnika wnikania ciepła, jako warunku brzegowego na wewnętrznej powierzchni kanału przy użyciu zmodyfikowanej korelacji Gnielinskiego.

Należy zwrócić uwagę na to, że istnieją programy, które oparte są na dokładniejszych modelach matematycznych i mogłyby znaleźć zastosowanie w obliczeniach zasobników ciepła. Przy obecnym poziomie techniki komputerowej problemem w przypadku analizy złożonych przypadków jest jednak bardzo długi czas obliczeń realizowanych z ich wykorzystaniem. Przykładem takiego programu jest wspomniany w pracy ANSYS Fluent.

Uproszczenia przyjęte w modelowaniu matematycznym pracy urządzeń wpływają na poprawność otrzymanych wyników obliczeń. Niewątpliwie jednak o poprawności modelu matematycznego decyduje jego weryfikacja doświadczalna. Autor rozprawy taką weryfikację przeprowadził w oparciu o pomiary zrealizowane na stanowisku badawczym, które zbudował w Instytucie Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza Politechniki Krakowskiej. Weryfikacja obejmowała szeroki zakres parametrów pracy układu i dotyczyła zarówno akumulatora ciepła, jak i wymiennika ciepła powietrze-ciecz. W pracy przedstawiono wyniki takiej weryfikacji dla cykli nagrzewania oraz dla pełnych cykli nagrzewania i chłodzenia akumulatora ciepła.

Zakres działań podjętych w ramach pracy doktorskiej jest bardzo szeroki. Opracowany, autorski model matematyczny układu oraz napisany program komputerowy można wykorzystać w dalszych badaniach binarnych układów solarnych, np. w analizach wpływu parametrów technicznych (w tym geometrycznych) na efektywność akumulacji ciepła. W pewnych przypadkach konieczne zapewne będą modyfikacje związane z wymianą ciepła z otoczeniem lub parametrami geometrycznymi rozważanego akumulatora ciepła, co w żadnym stopniu nie umniejsza wartości tego osiągnięcia. Stworzenie własnego narzędzia obliczeniowego, gwarantującego krótki czas obliczeń, przy wymaganej dokładności i wiarygodności rezultatów jest bardzo cenne. Autor dysertacji takie narzędzie opracował. Jak już wspomniano, może ono posłużyć do dalszych badań związanych z zaproponowanym układem solarnym, w tym także do analiz o charakterze optymalizacyjnym.

6. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Uwagi redakcyjne i językowe

W pracy pojawiły się pewne niedociągnięcia o charakterze redakcyjnym i językowym. Przykładem jest brak powołań na źródła niektórych informacji prezentowanych w rozdz. 1 (np. str. 5 rys. 3-5, str. 7 tabele 2, 3, str.11 rys. 8, 9) i w rozdz. 5 (tabele 16 i 17). Na str. 17 użyto sformułowań „wymiennik (...) zainstalowany jest na obiegu wodnym” (w.7), „na obiegu gorącego powietrza” (w.10), na str. 49 „bilans temperatury” (w.4), na str. 103 i 104 Autor zaś używa określenia „pełen cykl”. W kilku miejscach pracy fragmenty zdań zostały przeniesione do kolejnych wierszy. W załączniku 2 rysunek trzeci jest nieprawidłowo zatytułowany.

Uwagi merytoryczne

W rozdz. 4 Autor porównał dwuwymiarowe rozkłady temperatury otrzymane przy wykorzystaniu własnego rozwiązania, programu ANSYS Fluent i programu wykorzystującego MES (napisanego w języku Fortran). Czasy obliczeń w wariancie obejmującym 12 godzin znacząco się różniły. Obliczenia z wykorzystaniem programu ANSYS Fluent trwały 63 godziny, a w przypadku procedury Autora kilka sekund. Siatka wykorzystywana w symulacji wykonanej programem ANSYS Fluent była bardzo zagęszczona (46617 węzłów) w porównaniu z pozostałymi siatkami. Czy porównywano także wyniki obliczeń dla innych gęstości siatek?

W modelu akumulatora ciepła przyjęto różnicowy podział tego urządzenia wzdłuż drogi przepływu powietrza. Czy zbadano wpływ gęstości podziału na wyniki obliczeń i czas obliczeń?

W modelu akumulatora ciepła pierwotnie założono brak wymiany ciepła na zewnętrznej powierzchni kształtki. Przedstawione w pracy rezultaty wykazały jednak, iż uwzględnienie w obliczeniach wymiany ciepła z otoczeniem wpływa na poprawę zgodności wyników obliczeń i pomiarów. Czy istnieje możliwość wykorzystania programu przy uwzględnieniu tego zjawiska?

7. Podsumowanie

Mgr inż. Jacek Sacharczuk w swojej pracy doktorskiej przedstawił koncepcję oraz model matematyczny instalacji solarnej z akumulacją ciepła służącej do podgrzewania wody użytkowej i ogrzewania powietrznego. W oparciu o model matematyczny opracował oryginalny program komputerowy, a następnie przeprowadził weryfikację eksperymentalną modelu matematycznego. Cel pracy został osiągnięty, na co wskazują zaprezentowane rezultaty. Przedstawione w recenzji uwagi dyskusyjne i krytyczne nie umniejszają wartości pracy. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Sacharczuka spełnia wymagania stawiane przez ustawę z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Autora do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Matygora Małgorzata - Dyr