

Poznań, 30 marca 2016



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Instytut Inżynierii Środowiska

ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań

Prof. dr hab. inż. Janusz Wojtkowiak
tel. (61) 6652413, 6652442
fax: (61) 6652444
e-mail: janusz.wojtковиak@put.poznan.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka SACHARCZUKA

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

Recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej w związku z uchwałą z dnia 27 stycznia 2016 roku, przekazaną przez prof. dr hab. inż. Elżbietę Nachlik – Dziekan WIŚ PKr, w piśmie nr Ś0mm-520-155-16 z dnia 28.01.2016.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Oceniana praca liczy 175 stron i składa się z 9 rozdziałów poprzedzonych spisem treści. Rozprawę zamyka wykaz oznaczeń, bibliografia oraz dwa załączniki liczące 55 stron. Bibliografia obejmuje 59 pozycji, wśród których Doktorant jest współautorem 3 i samodzielnym autorem 1 publikacji. Z czterech wyżej wspomnianych prac Doktoranta dwie to artykuły z udziałem Promotora opublikowane w polskich czasopismach naukowo-technicznych – *Archives of Thermodynamics* (2014) i *Rynek Energii* (2013), jedna jest referatem zamieszczonym w materiałach XV Zjazdu Termodynamików (1993). Czwarta praca, z roku 1998, jest trudna do zidentyfikowania ze względu na niepełne dane bibliograficzne.

Uwagę zwraca brak streszczenia pracy doktorskiej. Mimo, że rolę tą w pewnym stopniu spełnia rozdział 9, to streszczenie (w j. polskim i w j. angielskim), jako ważna część każdej pracy promocyjnej, powinno być dołączone do ocenianej rozprawy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Sacharczuka ma charakter teoretyczno-doświadczalny i mieści się w dyscyplinie „inżynieria środowiska”.

2. Ocena tematyki pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Sacharczuka dotyczy jednego z ważnych sposobów zmniejszenia zapotrzebowania na energię niezbędną do zapewnienia komfortu cieplnego w budynkach. Sposób ten polega na wyposażeniu systemów ogrzewczych i wentylacyjno-klimatyzacyjnych w urządzenia magazynujące energię ciepłą przeznaczoną do wykorzystania w okresie jej niedoboru lub zwiększonego zapotrzebowania. W ocenianej pracy urządzeniami dostarczającymi energię ciepłą są kolektory słoneczne mogące współpracować z podgrzewaczami gazowymi lub elektrycznymi. Zastosowanie akumulatorów ciepła w postaci elementów betonowych jest rozwiązaniem o dużym potencjale rozwojowym. Beton, jak rzadko który materiał, umożliwia elastyczne łączenie wymagań konstrukcyjno-architektonicznych z wymaganiami dotyczącymi charakterystyki energetycznej budynków. Łatwość kształtowania elementów betonowych, możliwość prefabrykacji, trwałość i znaczna gęstość w połączeniu z możliwością wykorzystania dużych objętości stwarzają wyjątkowe możliwości akumulacji energii zarówno w postaci ciepła jak i chłodu.

Mimo, że potencjalne korzyści związane z zastosowaniem akumulatorów ciepła są niezaprzeczalne (zmniejszenie zużycia paliw kopalnych, ochrona środowiska w wyniku mniejszej emisji produktów spalania), to urządzenia te nie znalazły dotychczas szerokiego zastosowania. Powodów takiego stanu rzeczy jest kilka. Otwartą pozostaje kwestia właściwego doboru akumulatorów do źródeł ciepła. Rozwiązania wymaga również problem efektywnego dostarczania i odbierania zmagazynowanej energii cieplnej. Warunkiem właściwego doboru elementów systemu grzewczo-wentylacyjnego z akumulacją energii oraz optymalnej jego eksploatacji jest posiadanie możliwie dokładnego modelu matematycznego takiego systemu. Zbudowaniu takiego modelu poświęcona jest oceniana praca.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Jacka Sacharczuka jest ważna i aktualna.

3. Ogólna ocena treści pracy

W opiniowanej rozprawie Autor postawił sobie za cel zbudowanie modelu matematycznego, opisującego współpracę systemu solarnego z cieczowymi kolektorami słonecznymi, wyposażonego w wymiennik ciepła typu ciecz-powietrze oraz akumulator

ciepła w postaci bloku betonowego o strukturze kanałowej, dla którego nośnikiem ciepła jest powietrze.

Rozdział 1. ocenianej pracy zawiera przegląd urządzeń i systemów magazynowania energii cieplnej na potrzeby ogrzewania budynków ze szczególnym uwzględnieniem systemów solarnych. Rozdział ten będący częściowym przeglądem stanu wiedzy stanowi uzasadnienie celowości podjęcia tematu.

W rozdziale 2. sformułowane zostały teza, cel i zakres pracy. Teza pracy w brzmieniu: *„za pomocą prostych metod modelowania matematycznego możliwe jest prowadzenie symulacji działania hybrydowego systemu ogrzewania słonecznego, opartego o pomocnicze magazynowanie ciepła w akumulatorze betonowym o strukturze kanałowej”*, nie budzi zastrzeżeń.

Zakres pracy, na który składa się osiem zadań szczegółowych, tworzy spójną całość. Główne zadania dotyczą budowy modelu matematycznego analizowanego systemu, jego numerycznej implementacji, budowy stanowiska badawczego oraz eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanego modelu.

Cel, zakres i teza pracy zostały określone jasno i precyzyjnie. Wykazanie prawdziwości postawionej tezy należy uznać właściwe wyzwanie dla pracy doktorskiej.

W rozdziale 3. Kandydat przedstawił koncepcję systemu grzewczego z betonowym akumulatorem ciepła. W zaproponowanym systemie energia słoneczna absorbowana jest przez kolektory cieczowe. Magazynowanie ciepła odbywa się w pierwszej kolejności w zasobniku wodnym, stanowiącym źródło ciepłej wody użytkowej. Nadwyżki ciepła przekazywane są do wymiennika typu woda-powietrze, a następnie za pomocą podgrzanego powietrza do dodatkowego akumulatora betonowego wykorzystywanego do ogrzewania budynku. Jest to rozwiązanie interesujące choćby ze względu na możliwość połączenia systemów ogrzewania płaszczyznowego i powietrznego.

Rozdział 4., liczący 46 stron, zawiera szczegółowy opis modelu matematycznego analizowanego systemu. Rozdział obejmuje podstawy teoretyczne matematycznego modelowania nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych, charakterystykę zastosowanej do rozwiązania równania przewodzenia ciepła metody BMES (Bilansowej Metody Elementów Skończonych), uzasadnienie wyboru metody BMES polegające na porównaniu z klasyczną metodą MES oraz wynikami z programu CFD ANSYS, opis metody numerycznego rozwiązania dwuwymiarowego nieustalonego nagrzewania i chłodzenia bloku akumulatora wraz z uzasadnieniem przyjętych warunków brzegowych, model matematyczny instalacji solarnej zawierający równania modelujące promieniowanie słoneczne oraz równania

opisujące w sposób uproszczony ciepłe działanie obiegu kolektora słonecznego. Na szczególną uwagę w rozdziale 4. zasługuje duża szczegółowość informacji dotyczących metody BMES.

W rozdziale 5. Kandydat krótko opisał autorski program obliczeniowy symulujący pracę analizowanego systemu. Program został napisany w języku Fortran, składa się z 9 modułów. Zasadniczym elementem programu jest moduł BMES, w którym obliczane są temperatury w charakterystycznych punktach betonowego akumulatora. Ponadto program wyznacza temperatury powietrza wzdłuż drogi jego przepływu oraz ilość energii cieplnej zgromadzonej w akumulatorze.

Rozdział 6. zawiera przykładowe wyniki symulacji pracy analizowanego systemu. Obliczenia symulacyjne obejmują proces ładowania i rozładowania akumulatora oraz współpracę akumulatora z układem solarnym, lamelowym wymiennikiem ciepła i wodnym zasobnikiem ciepła. Otrzymane wyniki świadczą o jakościowej poprawności zaproponowanego modelu matematycznego i właściwym działaniu programu komputerowego.

Rozdziały 7. i 8. dotyczą zagadnienia **walidacji modelu**. Tytuły powyższych rozdziałów: „7. Weryfikacja doświadczalna modelu” i „8. Pomiarowa weryfikacja modelu” są niemal identyczne (synonimy). Zdaniem recenzenta, podział spójnej merytorycznie treści pomiędzy dwa rozdziały jest sztuczny i stanowi uchybienie natury redakcyjnej.

W omawianych rozdziałach Doktorant opisał stanowisko badawcze, uzasadnił potrzebę przeprowadzenia badań doświadczalnych oraz porównał wyniki symulacji komputerowych z wynikami pomiarów. Porównanie dotyczyło przebiegów czasowych temperatury wody i powietrza na wlocie i wylocie lamelowego wymiennika ciepła, bilansu ciepła tego wymiennika, zmian temperatury w wybranych punktach masy akumulacyjnej, bilansu energii akumulatora ciepła w fazie ładowania i rozładowania oraz profili temperatury w wybranych przekrojach akumulatora. Badania ujawniły potrzebę rozbudowy modelu teoretycznego o składniki bilansu ciepła opisujące straty do otoczenia przez izolowaną obudowę akumulatora. Po uwzględnieniu wyżej wspomnianych strat uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów.

W części doświadczalnej pracy na pozytywne podkreślenie zasługuje zastosowanie zaawansowanych narzędzi numerycznych do obróbki „surowych” danych pomiarowych w postaci filtracji cyfrowej za pomocą ortogonalnych wielomianów Grama oraz interpolacji wielomianowej za pomocą funkcji sklepanych. Niedostatkiem tej części pracy jest natomiast brak oceny niepewności wyników badań doświadczalnych.

Rozdział 9. zawiera podsumowanie rozprawy i wnioski z uzyskanych wyników.

Zaproponowanie autorskiego modelu matematycznego analizowanego systemu, jego numeryczna implementacja, zbudowanie stanowiska badawczego, pozytywna eksperymentalna weryfikacja (walidacja) zbudowanego modelu, analiza wyników i sformułowane wnioski stanowią o wartości merytorycznej oraz aplikacyjnej ocenianej pracy.

Cele rozprawy zostały osiągnięte, teza udowodniona, a otrzymane wyniki mogą być uznane za rozwiązanie ważnego problemu naukowego.

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi formalne (edytorskie)

Praca zawiera wyjątkowo mało usterek edytorskich. Język rozprawy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Układ pracy, mimo braku streszczenia i niepotrzebnego podziału merytorycznie spójnej treści na dwa rozdziały (7 i 8), można uznać za poprawny. Szczegółowa analiza tekstu ujawniła kilkanaście niżej wymienionych niedociągnięć o charakterze edytorskim.

1. Str. 4 wiersz 4d, zamiast „pojemność dwu-trzykrotnie większą” powinno być: „objętość dwu-trzykrotnie większą”.
2. Str. 5 rys. 3 i 4, zamiennie stosowanie pojęć „pojemność cieplna”, „pojemność cieplna właściwa” zamiast krótko „ciepło właściwe”
3. Str. 12 rys. 10 i str. 17 rys. 14: mała czytelność rysunków, które ponadto zawierają kilkadziesiąt nie wyjaśnionych oznaczeń liczbowych.
4. Str. 20 rys. 16: nie czytelne dane liczbowe ceramicznych modułów akumulacyjnych.
5. Str. 30 wiersz 9d, niezręczne sformułowanie: „rozkład pola temperatury”, powinno być: „rozkład temperatury” albo „pole temperatury”.
6. Str. 37 wiersz 5g (i na wielu innych stronach), jest: „przy pomocy arkusza...”, powinno być: „za pomocą arkusza...”
7. Str. 49 wiersz 5g, niezręczne sformułowanie: „... na podstawie bilansu temperatury...”, temperatura nie jest wielkością fizyczną, która podlega bilansowaniu.
8. Str. 53 (i na innych stronach): brak konsekwencji w oznaczeniach wielkości fizycznych. Symbole tych samych wielkości pisane są zamiennie czcionką prostą i pochyłą, np. Re i Re , ξ i ξ , n i n , T i T itd.
9. Str. 53 wiersz 4d, jest: $2300 < Re < 106$, powinno być: $2300 < Re < 10^6$.
10. Str. 61, rys. 53, w tytule rysunku podano „ $N = 90$ ” co prawdopodobnie oznacza 90. dzień roku, natomiast w spisie oznaczeń symbol N jest liczbą punktów pomiarowych. Ponadto w tytule rysunku 38 (to samo dotyczy rys. 40) brak informacji o lokalizacji powierzchni

na którą pada promieniowanie słoneczne (szerokość geograficzna) oraz informacji o orientacji przestrzennej tej powierzchni (azymut i pochylenie).

11. Str. 77 Tabela 20, w czwartym wierszu tabeli mamy: „Współczynnik a_1 ”, a powinno być: „Współczynnik a_2 ”.
12. Str. 91 wiersze 9d i 10d, zamienne stosowanie pojęć „stopień wielomianu” i „rzęd wielomianu”. Nazwa poprawna to: „stopień wielomianu”.
13. Str. 94 wiersz 2d, zamiast: „... temperatura zasilania regularnie wzrastała ...” powinno być: „... temperatura zasilania wzrastała ...”
14. Str. 100 rysunki 75 i 76, brak jasności co do lokalizacji punktów masy akumulacyjnej. Czytelnik nie ma pewności, czy symbole podane w legendzie w/w rysunków są zgodne z punktami pokazanymi na rys. 25 na str. 31?
15. Str. 104, zdanie zamieszczone pod wz. (137) jest niezrozumiałe (czegoś w nim brakuje).
16. Str. 119 pozycja „Sacharczuk, J. 1998 ...” w wykazie bibliografii – brak pełnych danych bibliograficznych.
17. Informacje zawarte w rozdziałach 7 i 8 powinny znaleźć się w jednym rozdziale.

4.2. Uwagi merytoryczne

1. Str. 26 wiersz 3g, w określeniu: „objętość obszaru kontrolnego” słowo „objętość” powinno być ujęte w cudzysłów. Analizowany problem jest dwuwymiarowy więc w równaniu (24) V_{la0c} nie jest objętością lecz powierzchnią.
2. Str. 26 wz. (26), co oznacza górny indeks „e” przy symbolach następujących wielkości:
 A^e, T_1^e, T_2^e, T_3^e ?
3. Str. 46 pomyłka w równaniu (72)

zamiast:
$$\frac{\partial i_p}{\partial T_p} = \frac{\partial i_p}{\partial T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} = c_p \frac{\partial T_p}{\partial z}$$

powinno być:
$$\frac{\partial i_p}{\partial z} = \frac{\partial i_p}{\partial T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} = c_p \frac{\partial T_p}{\partial z}$$

4. Str. 53 wiersz 11g, w opisie do równania Dittusa-Boeltera (wz. (93)) podano warunek $d_w/L > 10$, a powinno być: $L/d_w > 10$.
5. Str. 53 wiersz 7d, w równaniu Pietuchowa i Gnielińskiego ξ nie jest „współczynnikiem szorstkości przewodu” lecz „współczynnikiem tarcia”.
6. Str. 60 wz. (112) i str. 61 wz. (113), zamiast: $[W/m^2 h]$ powinno być: $[W/m^2]$.

7. Str. 69 Tabela 16 i 17, brak informacji w jaki sposób otrzymano równania aproksymujące właściwości fizyczne wody i powietrza? Jaka jest dokładność zastosowanych równań? Jaki jest zakres ich stosowalności? Jakie dane empiryczne (tablicowe) wykorzystano do otrzymania podanych równań?
8. Str. 72, jaki jest sens fizyczny cyfry 2 na początku prawej strony równania (129)? Jeżeli 2 oznacza podwójną długość modułu akumulatora (dwa równoległe ciągi elementów akumulatora), to jest to niezgodne ze schematem pokazanym na rys. 15 na str. 20.
9. Str. 72 w tekście nad rysunkiem 46 podano prędkości powietrza w kanale: 1,8 m/s, 2,9 m/s i 5,1 m/s, podczas gdy w legendzie rysunków 46 ÷ 51 widnieje: 1,1 m/s, 2,2 m/s i 4,4 m/s. Z czego wynikają te różnice?
10. Str. 76 Tabela 19, co oznacza liczba 56 w mianowniku wyrażenia $I(S45) \times A_c / 56$? Jeżeli jest to pojemność akumulacyjna układu w MJ, to dlaczego w tekście na str. 76 w wierszu 6g podano wartość 57,5 MJ? Ponadto, jako jednostkę $I(S45) \times A_c$ podano: $[MJ/m^2d]$, a powinno być: $[MJ/d]$.
11. Str. 83 w tabelach 21 i 22 zamieszczono wykazy przyrządów pomiarowych wykorzystywanych na stanowisku badawczym. Szkoda, że informacje o niepewnościach pomiarowych typu A (podane w formie klas przyrządów) nie zostały wykorzystane do oszacowania niepewności wyników końcowych.
12. Strony 106÷110 na rysunkach 83, 84, 87, 88, 91, 92 pokazano zmienne w czasie profile temperatury w charakterystycznych przekrojach akumulatora ciepła. Brakuje choćby krótkiej analizy zamieszczonych profili.

Powyższe uwagi w znacznej części mają charakter dyskusyjny i nie podważają najważniejszych osiągnięć ocenianej pracy.

5. Podsumowanie

Praca, jest napisana bardzo poprawnym językiem. Stosowana terminologia (poza nielicznymi wyjątkami), nie budzi zastrzeżeń. Autor wykazuje dobrą znajomość omawianych zagadnień, umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania.

Za oryginalny dorobek naukowy Kandydata należy uznać:

- zbudowanie modelu matematycznego analizowanego systemu ze szczególnym uwzględnieniem betonowego akumulatora kanałowego,
- napisanie programu komputerowego będącego numeryczną implementacją zaproponowanego modelu,

- budowę stanowiska badawczego umożliwiającego analizę działania systemu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych,
- przeprowadzenie doświadczalnej weryfikacji (walidacji) modelu matematycznego i związanego z nim programu komputerowego,
- sformułowanie wniosków o dużym praktycznym znaczeniu.

6. Wniosek końcowy

Reasumując, uważam, że **praca doktorska mgr inż. Jacka Sacharczuka spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** określone w art. 13 ust. 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami).

Stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

