dr hab. inż. Jarosław Bartoszewicz, prof. nadzw.
Politechnika Poznańska
Wydział Maszyn Roboczych i Transportu

Poznań, 26.11.2014

R E C E N Z J A

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdy Joachimiak
pt. „Analiza procesu nagrzewania w oparciu o rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła"
napisanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Michała Ciałkowskiego

1. Formalna podstawa opracowania recenzji

   Opracowania recenzji podjęto na podstawie pisma DR-63/495/02/2014 zleconego przez Pana Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej z dnia 07.11.2014 i umowy o dzieło nr DR-63/495/02/2014.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

   Przedstawiona do oceny praca doktorska poświęcona jest bardzo ważnej i aktualnej problematyce związanej z poszukiwaniem odpowiedzi na pytania dotyczące poprawy efektywności realizowanych procesów cieplno-przepływowych, a w tym szczególnym przypadku procesu obróbki cieplno-chemicznej. Opisane w pracy zagadnienie wykorzystania metody numerycznej bazującej na rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego przewodnictwa ciepła do analizy zjawisk cieplno-chemicznych mieści się w zakresie nauk technicznych w dyscyplinie: budowa i eksploatacja maszyn. Tytuł rozprawy odpowiada jego treści, a temat badawczy ma cechy dysertabilności, tzn. jest oryginalny, zasadny i istotny z punktu widzenia aktualnych trendów badawczych. Temat rozprawy nie wskazuje jednak jednoznacznie obiektu badań, czyli nie odpowiada na pytanie, co jest przedmiotem nagrzewania. Precyzyjnie określono natomiast cele jakie autorka zrealizowała, rozważany problem i zakres badań podjętych w pracy doktorskiej.
   Rozprawa doktorska pt. „Analiza procesu nagrzewania w oparciu o rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła" liczy 114 stron wydruku formatu A4 wykonanego jednostronnie. Składa się z dziesięciu rozdziałów poprzedzonych spisem treści oraz wykazem oznaczeń, a kończących się wykazem cytowanej literatury zawierającej 47 pozycji w tym 5 publikacji współautorskich doktorantki oraz trzema załącznikami.

   Spis treści zawarty został na dwóch stronach. Ujednolicenia wymaga nazewnictwo użyte w podrozdziałach od 4.6 do 4.8.

   Spis ważniejszych oznaczeń zamieszczono na 2-ch stronach. Nie budzi zastrzeżeń przyjęta symbolika i jednostki z jednym zastrzeżeniem. W dyscyplinie: mechanika i budowa maszyn zwyczajowo liczby podobieństwa oznaczane są dwuliterowo, gdzie pierwsza litera jest duża (np. Liczba Eulera to Eu, a nie jak w pracy e). Usterka ta nie jest istotna i należy zwrócić uwagę, że przyjęta w tym przypadku symbolika jest zgodna ze stosowaną w dyscyplinach: matematyka i informatyka.

Rozdział pierwszy (Wstęp przedstawiono na 3-ch stronach) zawiera uzasadnienie podjęcia tematu, zakres analizy, opis przedmiotu badań i celów rozprawy. Opisuje metodę pomiarową, schemat konstrukcyjny pieca do azotowania z zaznaczonymi głównymi kierunkami przepływu gazu.
Uwagi. W prawie całej pracy autorka unika stosowania akapitów jako wyróżników w tekście. Wątpliwości budzi stwierdzenie, że pomiar temperatury na brzegu obarczony jest dużym błędem, gdy wymiana ciepła zachodzi głównie poprzez radiację. W analizowanym przypadku transport ciepła odbywa się na trzy sposoby: poprzez radiację od cząstek gazu, poprzez konwekcję wymuszoną wentylatorem lub konwekcję naturalną podczas braku wymuszenia oraz w niewielkim stopniu przez przewodzenie, gdyż walec połączony jest w kilku punktach z konstrukcją wewnątrz pieca nie gwarantującą izolacji termicznej. Podobnie sformułowanie w zdaniu „Wówczas pomiar temperatury …, obarczony jest błędem" jest nieprecyzyjne, ponieważ wszystkie pomiary cechują się występowaniem błędów. Mogą być one spowodowane różnymi przyczynami i mieć różne wartości, czasami bardzo małe. Podobnie kontrowersyjny jest zapis, że rozwiązanie odwrotne daje możliwość dokładniejszego wyznaczenia temperatury. Należy zapytać, co jest wiarygodniejsze: pomiar z bezpośredniej obserwacji, czy wynik obliczeń uzyskanych na podstawie pomiaru. Odpowiedź na takie pytanie wymaga oszacowania błędów obu eksperymentów. W ostatnim zdaniu podrozdziału 1.1 niefortunnie użyto zwrotu „tempo nagrzewania" powinno być „szybkość nagrzewania". W podrozdziale 1.2 autorka pisze o „dużym stopniu turbulencji" nie wyjaśniając, co oznacza „duży" lub nie odnosząc badanego przypadku do innego znanego w literaturze.

Rozdział drugi (Przegląd literatury zaprezentowano na 3 stronach) obejmuje analizę stanu wiedzy w obszarze objętym tematyką rozprawy. Autorka mało obszernie opisuje problematykę nagrzewania poprzez promieniowanie, pomiarów temperatury na powierzchni oraz sposoby rozwiązywania zagadnień odwrotnych. W sposób obszerniejszy charakteryzuje metody numeryczne dotyczące rozwiązania zagadnienia odwrotnego przewodnictwa ciepła, który to fragment obejmuje blisko 2/3 rozdziału. Końcowa część przeglądu literatury poświęcona jest wpływowi gazu, azotu, na proces wymiany ciepła oraz informacji o metodach pomiaru strug w komorach zamkniętych.

W rozdziale trzecim zawartym na 1 stronie sformułowano cel pracy, zadania szczegółowe oraz tezy poddane w analizowanej pracy. Po zapoznaniu się z całą pracą stwierdzam, że cel pracy jakim jest rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła, będącego podstawą do analizy procesów nagrzewania został osiągnięty przez autorkę rozprawy. Zadania szczegółowe zrealizowano prawie w całości. Realizacja 1, 2, 3, 4, 5-go celu szczegółowego nie budzi zastrzeżeń. Analiza procesów nagrzewania na podstawie otrzymanych wyników jest jednak powierzchowna. Postawione w pracy tezy są sformułowane poprawnie z zastrzeżeniem, że druga jest sformułowana zbyt ogólnie.
Uwagi. W celu szczegółowym 3 należało by zmienić żargonowy zwrot: „przy różnych nastawach" na „dla zmiennych warunków brzegowych". Nie jestem pewien, czy w

zadaniu 4-m zasadnie użyto słowa „propagacja” jako zmiana, czy rozprzestrzenianie się? W odniesieniu do tezy drugiej: Wykorzystana metodologia może mieć dalsze zastosowanie, a wyniki jedynie ją uwiarygadniają lub dyskwalifikują.
Rozdział czwarty przedstawiono na 43 stronach, scharakteryzowano w nim sposób rozwiązywania liniowego zagadnienia odwrotnego, a w szczególności sposób rozwiązania zagadnienia prostego i odwrotnego, wrażliwość zagadnienia odwrotnego na: pojawiające się błędy pomiarowe oraz przy zastosowaniu rozkładu SVD. Kolejne podrozdziały dotyczą zobrazowania wrażliwości rozwiązania zagadnienia odwrotnego dla błędów pomiarowych generowanych przez termopary.
Uwagi. W podrozdziale 4.1 w drugim zdaniu należy zastąpić fragment „dla symetrycznego pola” precyzyjniejszym zwrotem „dla rozkładu osiowosymetrycznego”. Na str. 17 od góry po zwrocie „funkcją Bessela I” zamienić na „funkcją Bessela I-ego”. Na str. 19 nad wzorem 4.34 zapisano, że wprowadza się oznaczenia nie definiując jakie to oznaczenia. W rozdziale tym pojawiają się w wielu miejscach np. str. 18 podpis pod rys. 4.1, str. 20 lokalizacja termoelementu, str. 30 r=… symbole wprowadzające niepewność odnośnie zastosowanych oznaczeń względnych i bezwzględnych. Na str. 24 pod wzorem 4.60 użyto nieprecyzyjnego zwrotu „w sposób najdokładniejszy” nie definiując, co autorka uważa za najdokładniejsze. W pracy rozważano trzy wartości współczynnika całkowania Θ, ale nie opisano jego roli i powodów przyjęcia wartości od 0,5 do 0,52 z przedziału (0,1). Zastosowanie zmiennej skali rzędnych na rys. 4.8 bez ich komentarza utrudnia ich interpretację. Zauważalny jest fakt, że w początkowych odcinkach czasu metody: zo_pp_ran i zo_mm_ran stanowią górne i dolne odchylenie od wartości z rozwiązania prostego, a tymczasem po czasie 300 sekund ich oscylacje stają się w przybliżeniu równomierne wokół rozwiązania prostego.

Rozdział piąty zawarto na 17-tu stronach, na których autorka przedstawiła analizę nieliniowego zagadnienia odwrotnego, czyli takiego, w którym współczynnik przewodzenia ciepła materiału walca, jego ciepło właściwe oraz współczynnik wyrównywania temperatury zmienia się w funkcji temperatury. Autorka uzasadnia powody wprowadzenia do analizy zmiennych wartości wzmiankowanych wielkości, prezentuje sposób rozwiązania problemu poprzez: rozwiązanie zagadnienia prostego, nieliniowego zagadnienia odwrotnego, analizę wrażliwości rozwiązania zagadnienia odwrotnego na błędy pomiaru temperatury oraz prezentuje w tym rozdziale przykłady rozwiązań dla różnych warunków brzegowych.
Uwagi. Przedstawione na str. 41 wartości zmian współczynnika przewodzenia ciepła materiału walca, jego ciepła właściwego oraz współczynnik wyrównywania temperatury wymagają rozszerzenia. Przedstawione dane sugerują, że zmiany tych wielkości w funkcji temperatury są stałe, co nie jest informacją precyzyjną. W moim odczuciu należało wprowadzić na rys. 5.1 dodatkową skalę z prawej strony i zaprezentować na niej wartość względną np. $(a/a_{20^oC})100\%$, $(c/c_{20^oC})100\%$, itd. Pozwoliło by to na określenie charakteru tych zmian. Uzyskane wyniki przedstawione na rysunku 5.4 uzupełnione zostały o podanie wartości średniej. Nie wyjaśniono w pracy, czy jest to wartość z całego przedziału od 0 s, czy może pominięto początkowy odcinek czasu np.

do 10 000 sekund. Zrozumienie sensu fizycznego wartości średniej z tych danych nie jest jednoznaczne.

W rozdziale szóstym przedstawionym na 9 stronach opisano stanowisko pomiarowe, którego podstawą jest piec do odpuszczania z możliwością azotowania. Autorka omówiła system pomiarowy i opisała program do sterowania i rejestracji. Zaprezentowała jego budowę oraz scharakteryzowała elementy mogąc wpływać na dokładność pomiarów w zaprojektowanym doświadczeniu eksperymentalnym. Na zdjęciach rys. 6.5 i 6.6 zaprezentowała wnętrze komory roboczej, z zamontowanym walcem oraz zabudowanymi termoparami do badania rozkładu temperatury na jego powierzchni. W rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych rozkładu temperatury wzdłuż osi walca.
Uwagi. W rozdziale tym przedstawiono zbyt mało informacji o aerodynamice ruchu mas gazu wewnątrz komory roboczej pieca do nawęglania. Z danych zawartych na rysunku 6.4 wynika, że brak jest współosiowości podstawowych elementów pieca: wentylator-komory roboczej-badanego walca. Budzi to wątpliwości co do równomierności opływu walca i identyczności współczynników przejmowania ciepła. Dodatkowe zastrzeżenie budzi umiejscowienie termopar za wspornikami utrzymującymi walec w komorze roboczej. Takie umiejscowienie skutkuje zintensyfikowaniem procesów wymiany ciepła na drodze konwekcji poprzez pojawienie się wirów Kormana.

Rozdział siódmy obejmuje 5 stron, na których zaprezentowano wyniki z obliczeń numerycznych przy użyciu programu freeFEM++, w którym rozwiązano zagadnienie proste z zastosowaniem rachunku wariacyjnego i metody elementów skończonych. Autorka uzyskała rozkłady temperatury na brzegu walca w oparciu o wstępne badania eksperymentalne oraz aproksymacje wielomianami Czebyszewa.

Rozdział ósmy zamieszczony na 9-ciu stronach prezentuje wyniki badań eksperymentalnych. W rozdziale tym przedstawiono sposób doboru punktów pomiarowych, sposoby montażu termopar w celu eliminacji niepożądanych zjawisk fizycznych oraz wyniki badań.
Uwagi. Wyjaśnienia wymaga sposób zamocowania termopar.

Rozdział dziewiąty zawarty jest na 11-stu stronach i przedstawia wyniki obliczeń numerycznych bazujących na wcześniejszych pomiarach eksperymentalnych. Analizę prowadzono dla trzech różnych wariantów obejmujących całokształt analiz prezentowanych we wcześniejszych rozdziałach. Zasadniczą częścią tego rozdziału jest prezentacja wyników walidacji wyników badań eksperymentalnych i wyników analiz numerycznych uzyskanych przy użyciu modelu nieliniowego. Porównanie wyników uzupełnione jest analizą możliwych przyczyn pojawiających się różnic pomiędzy wynikami badań i obliczeń numerycznych.
Uwagi. Zaprezentowana analiza wyników mogła by być rozszerzona o dodatkowe elementy i zjawiska mogące mieć wpływ na powstałe rozbieżności pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych. Autorka takiej próby nie podjęła.

Brak oceny wpływu procesów: konwekcyjnych i przewodzenia ciepła na uzyskane wyniki.

Rozdział dziesiąty przedstawiono na 3-ch stronach i dotyczy podsumowania pracy. W podsumowaniu, autorka, charakteryzuje swoją rozprawę opisując zadania, które zrealizowała zmierzając do realizacji celów pracy. Prezentuje najważniejsze wyniki uzyskane w ramach badań eksperymentalnych i numerycznych. Odpowiada na tezy postawione wśród celów pracy dowodząc ich poprawności.
Uwagi. W rozdziale tym największe kontrowersje wzbudziło we mnie sformułowanie, że „Wnioski z badań przeprowadzonych w ramach tej pracy stanowią podstawę do analizy procesów nagrzewania dla innych geometrii wsadu oraz dla bardziej złożonych procesów nagrzewania odpowiadającym procesom przemysłowym." To właśnie odniesienie do procesów przemysłowych, rzeczywistych budzi moje zastrzeżenia, gdyż analiza wykonana została dla przypadku idealnego, nie zakładającego wpływu konwekcji i przewodzenia ciepła, czyli wpływu geometrii i mocowania walca na procesy wymiany ciepła. Za poprawne uważam stwierdzenie, że wyniki są adekwatne od analiz nagrzewania powierzchni walcowych w okolicach temperatury 550^{o}C, co odpowiada powierzchniom ogrzewalnym o charakterze konwekcyjno-odpromieniowanym.

<u>Uwagi wymagające odpowiedzi:</u>

1. Na jakiej podstawie autorka sądzi, że walec gwarantuje równomierność nagrzewania skoro nie mamy współosiowości elementów konstrukcyjnych pieca i walca rys 1.1 i rys. 6.4.
2. Wyjaśnienia wymaga przyjęcie w analizie dla jednego termoelementu w podrozdziale 4.7 jego dokładności równej 2,2^{o}C, ponieważ jest to dokładność wskaźników temperatury a nie termometrów pomiarowych.
3. Proszę wyjaśnić sens fizyczny wyników zaprezentowanych na rys. 4.9 dla danych po czasie 150 sekund.
4. Proszę wyjaśnić przyjęcie dokładności pomiarowej termopary na poziomie 0,2^{o}C zastosowane w przykładach numerycznych w podrozdziale 5.3.
5. Wyjaśnienia wymaga sposób zabudowy termopar pomiarowych w kontekście zastosowanych osłon termicznych oraz past przewodzących ciepło. Czy termopary miały osłony termiczne i czy zastosowano pasty o dużych współczynnikach przewodzenia ciepła.

3. Ocena wartości merytorycznej rozprawy

W mojej opinii, struktura pracy nie budzi zastrzeżeń. Rozprawę uznaję za spójną, jej objętość za adekwatną do zakresu tematycznego i mieszczącą się w ramach przyjętych dla prac doktorskich. Autorka poprawnie cytuje źródła literaturowe. Praca spełnia kryteria edytorskie, jest napisana przy użyciu fachowego języka z troską o logikę wypowiedzi i naukowe wnioskowanie.
Podjęte przez autorkę badania są oryginalne i istotne zarówno dla teorii wymiany ciepła jak i praktyki przemysłowej, a w szczególności procesów obróbki cieplno-chemicznej.

Autorka podjęła się próby rozwiązania równania przewodnictwa ciepła dla zagadnienia prostego i odwrotnego. Badania eksperymentalne pozwoliły autorce na opanowanie technik pomiaru temperatury, prędkości oraz strumieni masy w warunkach badań na piecu przemysłowym. Do najważniejszych zaliczyć należy: umiejętność rozwiazywania równań opisujących ruch energii przy użyciu programów własnych i komercyjnych, umiejętność projektowania eksperymentu i wykonania złożonych badań eksperymentalnych. Całokształt opanowanych umiejętności świadczy o dużej uniwersalności w przygotowaniu doktorantki do dalszej pracy naukowej.
Autorka wykazała się w pracy umiejętnością: stawiania tez, formułowania celów badawczych, wykazała się umiejętnościami projektowania i budowy stanowisk pomiarowych z dbałością o jakość uzyskiwanych wyników pomiarowych. Autorka rozprawy udowodniła, że w sposób wyważony w oparciu o dane literaturowe i własne interpretacje danych potrafi udowodnić stawiane tezy i formułować wnioski o charakterze utylitarnym.
Powyższe argumenty uprawniają mnie do stwierdzenia, że autorka osiągnęła założone w rozprawie cele i wykazała się bardzo dobrym poziomem przygotowania merytorycznego, umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz poprawnym wnioskowaniem w oparciu o ich wyniki.

4. Podsumowanie

Moim zdaniem rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdy Joachimiak stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, potwierdza wiedzę autorki w obszarze analiz procesów cieplno-chemicznych przy zastosowaniu zaawansowanych technik numerycznych, pokazuje samodzielność autorki w zakresie realizacji badań naukowych. Autorka wykazała się znajomością literatury specjalistycznej związanej z tematyką rozprawy, a rozprawa posiada znaczące walory poznawcze i twórcze.
Dostrzeżone w rozprawie kwestie dyskusyjne i usterki w rozprawie nie umniejszają walorów jakościowych pracy.
Przedstawioną do oceny pracę doktorską oceniam pozytywnie.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Analiza procesu nagrzewania w oparciu o rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła" autorstwa mgr inż. Magdy Joachimiak spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) i może stanowić podstawę do nadania jej Autorce stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie: budowa i eksploatacja maszyn, po spełnieniu pozostałych warunków określonych w przywoływanej Ustawie.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

(Jarosław Bartoszewicz)