



prof. dr hab. inż. Jacek Leszczyński  
ul. Sosabowskiego 7 m 46  
42-200 Częstochowa

Częstochowa, 24.06.2014 r.

PN

PRODZIEKAN  
ds. Organizacji i Rozwoju  
dr hab. inż. Anna Timofiejczuk,  
prof. zwł. w Pol. Sl.

## RECENZJA

**pracy doktorskiej mgr inż. Łukasza Turchana**

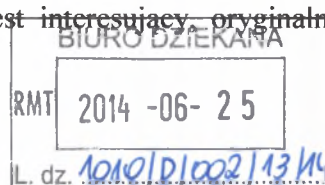
**pt. „Analiza numeryczna sztucznej hipertermii z wykorzystaniem różnych modeli przepływu biociepła”**

### Podstawa przygotowania recenzji

Pismo Pana Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej nr RMT0-968/D/006/13/14 z dnia 11 czerwca 2014 roku o powołaniu mojej osoby przez Radę tego Wydziału na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Turchana.

### 1. Uwagi ogólne

Opiniowana praca została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak. Dotyczy ona ważnych zarówno z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia zagadnień związanych z modelowaniem przepływu ciepła w organizmach żywych. Obserwowany aktualnie rozwój metod leczenia z wykorzystaniem sztucznej hipertermii nie byłby możliwy bez sformułowania modeli matematycznych opisujących przebieg tego typu procesów, a następnie (biorąc pod uwagę stopień ich komplikacji) wykorzystania metod modelowania komputerowego. Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Turchana dobrze wpisuje się we współczesne trendy badań interdyscyplinarnych, w tym przypadku związanych z tzw. przepływem biociepła (*ang. bio-heat transfer*). Mimo, że badania związane z tą tematyką rozwijane są intensywnie w kraju i na świecie (w Polsce przede wszystkim w zespołach kierowanych przez profesor Ewy Majchrzak i profesora Bohdana Mochnackiego), to temat recenzowanej rozprawy doktorskiej jest interesujący, oryginalny



T

i wnosi znaczący wkład do teorii i praktyki modelowania przepływu ciepła w tkance biologicznej.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że pracę wykonano w ramach projektu badawczego finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki (Projekt DEC-2011/01/N/ST6/05231).

**Mimo interdyscyplinarnego charakteru rozprawy, można ją bez zastrzeżeń przyporządkować do dyscypliny mechanika.**

## **2. Przegląd treści rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 146 stron i składa się z 9 rozdziałów, wykazu literatury zawierającego 129 pozycji (w tym, co zasługuje na podkreślenie, 20 prac jest współautorstwa doktoranta) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1 sformułowano cel i zakres pracy. Przedstawiono w dużym skrócie kolejne etapy rozwoju metod leczenia polegających na lokalnym nagrzewaniu tkanki, podano zakresy zastosowań metod sztucznej hipertermii, omówiono sposoby opisu matematycznego procesów cieplnych zachodzących w tkance biologicznej, sformułowano cel rozprawy doktorskiej oraz przedstawiono najważniejsze informacje o zawartości kolejnych rozdziałów. Do treści prezentowanych w rozdziale 1 nie mam zastrzeżeń, znalazłem w nim nawet kilka ciekawych informacji z historii medycyny. Jedyna uwaga dotyczy stwierdzenia, że „*ciepło w rozpatrywanym medium rozchodzi się natychmiastowo, czyli długość fali cieplnej jest nieskończona*”. Chodzi tu oczywiście o prędkość propagacji fali cieplnej (uwaga ta odnosi się również do dalszych rozdziałów pracy).

Rozdział 2 zawiera przegląd modeli matematycznych opisujących przepływ ciepła w tkance biologicznej. Doktorant omawia tzw. modele tkankowe, a przede wszystkim znane równanie Pennesa. Jego modyfikacją może być równanie Cattaneo-Vernotte'a, w którym pojawia się czas relaksacji - czyli czas „opóźnienia” strumienia ciepła w stosunku do gradientu temperatury oraz równanie z dwoma czasami opóźnień (*ang. Dual Phase Lag Model*). Następnie Doktorant dyskutuje modele bazujące na teorii ciał porowatych, które zresztą twórczo rozwija w dalszych częściach rozprawy. Rozdział 2 kończy się omówieniem oceny stopnia destrukcji tkanki poddanej działaniu podwyższonej temperatury - informacje w nim zawarte będą wykorzystywane w kolejnych rozdziałach pracy.

Rozdział 3 został poświęcony modelowaniu sztucznej hipertermii z wykorzystaniem równań należących do modeli tkankowych. Na uwagę zasługuje fakt opracowania przez

Doktoranta programów autorskich bazujących na schemacie jawnym metody różnic skończonych i rozwiązanie zadania brzegowo - początkowego dotyczące nagrzewania sześciennego fragmentu tkanki z umiejscowionym w centralnej jej części podobszarem nowotworu. Parametry termofizyczne tkanki nowotworowej są takie same jak tkanki zdrowej, natomiast w podobszarze nowotworu pojawia się dodatkowy składnik źródłowy. Na brzegach obszaru założono warunki adiabaticzne. Temperatura początkowa tkanki i początkowa prędkość nagrzewania (dotyczy równania C-V i DPLM) jest oczywiście znana. Zadanie rozwiązano metodą różnic skończonych rozpatrując przy tym zarówno model Pennesa, jak i Cattaneo-Verotte'a, i również DPLM. Algorytm komputerowy dotyczy modelu z dwoma czasami opóźnień, a przyjmując w nim zerowe wartości opóźnień można symulować nagrzewanie tkanki wg dwóch pozostałych modeli. Równania MRS są dosyć skomplikowane i rozbudowane - Doktorant podaje wyprowadzony przez siebie warunek stabilności schematu jawnego. Przeprowadzone obliczenia pozwalają na porównanie kolejnych rozwiązań i sformułowanie kilku interesujących wniosków.

Rozdział 5 stanowi ważną część rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Turchana i przedstawia model z dwoma czasami opóźnień z uwzględnieniem żył i tętnic. Jest to inny typ modelu przepływu biociepła bazujący na teorii ciał porowatych. We wstępie Doktorant odwołuje się do pracy Afrina, Zhanga i Chena, ale uzyskane przez Niego równania różnią od prezentowanych w cytowanej publikacji (w której zresztą nie przedstawiono żadnych wyników symulacji komputerowych). Wyprowadzenie równania przepływu biociepła z wykorzystaniem teorii ciał porowatych jest niezwykle żmudne i skomplikowane (np. na stronie 72 „zmieściły się” tylko 3 wzory). W tekście omawianego rozdziału Doktorant podaje ważne wzory dotyczące wyznaczenia czasów opóźnień i współczynnika sprzężenia będących funkcjami parametrów tkanki i naczyń. Ważnym uzupełnieniem omawianego rozdziału jest prezentacja algorytmu komputerowego i wyników symulacji.

W rozdziale 6 przedstawiono model procesu nagrzewania tkanki skórnej z wykorzystaniem wyprowadzonych w poprzednim rozdziale równań. Rozpatrywano obszar walcowy, w którym wyróżniono warstwy naskórka, skóry właściwej i tkanki podskórnej. Na górnej powierzchni naskórka założono działanie zewnętrznego źródła ciepła (warunek Neumanna – wzór (6.21)). Tego typu postać funkcji widziałem też w jednym z artykułów – Autor nie cytuje jednak źródła inspiracji. Na granicach między podobszarami założono warunki kontaktu idealnego, na powierzchni bocznej i dolnej umownie wyciętego walca – warunki adiabaticzne. Obliczenia nieustalonego pola temperatury w rozpatrywanym obszarze

uzupełniono wyznaczeniem lokalnych wartości całki Arrheniusa pozwalającej ocenić stopień ewentualnej destrukcji tkanki.

Autor rozprawy przeprowadził również w określonym zakresie weryfikację eksperymentalną wyników symulacji komputerowych. Analizowano zmiany temperatury w walcowej próbce wykonanej z wątroby wieprzowej (materiał łatwo dostępny o znanych parametrach termofizycznych). Stanowisko badawcze zaprojektowano w ten sposób, że boczna powierzchnia walca była zaizolowana (warunek adiabatyczny), dolna powierzchnia utrzymywana była w stałej temperaturze (warunek Dirichleta), a górna powierzchnia oddawała ciepło do otoczenia o znanej temperaturze i znanym współczynniku wnikania. Temperaturę powierzchni próbki mierzono kamerą termowizyjną. Otrzymane krzywe nagrzewania w wyróżnionym punkcie próbki porównano z symulacjami komputerowymi modeli bazujących na równaniu Pennesa i uogólnionym równaniu z dwoma czasami opóźnień. Nie wnikając w szczegóły weryfikacja doświadczalna wypadła zadowolająco.

Rozdział 8 rozprawy zawiera informacje o opracowanych przez Doktoranta programach symulujących przepływ ciepła w rozpatrywanych obszarach tkanki - badano również wpływ dyskretyzacji czasu i przestrzeni na wyniki obliczeń numerycznych.

W ostatnim rozdziale pracy sformułowano uwagi i wnioski końcowe, do których nie mam żadnych zastrzeżeń.

Kilka uwag krytycznych:

- Wzór (2.25) wywodzi się ze znanej metody prostokątów. Nie wyjaśniono co oznacza  $t$  z indeksem  $f$  u góry i zakres sumowania nie jest poprawny. Taka sama uwaga odnosi się do podobnego wzoru (2.32) w dalszej części pracy.
- Równanie (3.4) przy powołaniu się na wzór (3.3) nie zawiera pochodnej  $Q_{ex}$  po czasie.
- Zdefiniowanych w jednym miejscu symboli nie trzeba definiować powtórnie (np. pod wspomnianym już wzorem (3.4)).
- Co to znaczy „Rozkład temperatury w 1/8 modelu” (m.in. rys 3.12) – brzmi to raczej humorystyczne.
- Pisząc o trudności oceny wpływu zmian wielu parametrów na zmiany przebiegu temperatury (str. 54) Doktorant winien wspomnieć o możliwościach jakie daje analiza wrażliwości.

- W równaniach przedstawionych w rozdziale 6 Autor nagle wprowadza ciepło właściwe odniesione do jednostki objętości. Robi to niekonsekwentnie i np. wzór (6.1) nie jest poprawny.
- W rozdziale 8 pojawia się warunek brzegowy III rodzaju (górna powierzchnia próbki). Nie znalazłem w pracy żadnych informacji o sposobie aproksymacji tego warunku, a chyba nie jest to proste szczególnie w modelach z czasami opóźnień.
- Omawiając przeprowadzone eksperymenty Doktorant zauważa, że „*trudno było ustalić, jak długo mięso przebywało w sklepie*”. Czy ma to znaczenie dla poprawnego określenia parametrów termofizycznych?

Należy jednak podkreślić, że opiniowana rozprawa napisana jest na wysokim poziomie naukowym (i również edytorskim). Doktorant wykazał się znaczną wiedzą w dziedzinie podstaw teoretycznych przepływu biociepła (które zresztą w pewnym stopniu rozszerzył), bardzo dobrą znajomością metod numerycznych, a w szczególności metod przybliżonego rozwiązywania zadań brzegowo-początkowych, umiejętnością pisania rozbudowanych i skomplikowanych programów komputerowych, a nawet umiejętnościami przeprowadzania eksperymentów fizycznych.

Recenzowana praca doktorska jest bardzo dobra i wymagała ogromnego nakładu pracy. Zawiera bardzo ciekawe (również dla praktyki medycznej) wyniki. **Biorąc dodatkowo pod uwagę znaczny dorobek publikacyjny Doktoranta oraz wyniki opracowane w rozprawie wnioskuję o jej wyróżnienie.**

### 3. Wniosek końcowy

Pragnę stwierdzić, iż mgr inż. Łukasz Turchan wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a recenzowana praca doktorska spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14 marca 2003r. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechanicznego - Technologicznego Politechniki Śląskiej.



Turch  
Łuczyna