

Prof. dr hab. Wiesław Nagórko
Rada Towarzystw Naukowych PAN

Warszawa, 30.04.2023

ul. Elegijna 25
02-787 Warszawa

POLITECHNIKA BYDGOSKA
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
Wpłynęło..... 11 05 2023
Numer WBAiIŚ.....
Referent/symbol.....

O c e n a

rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Sosnowskiej
pt. *Modelowanie termodyfuzji sprzężonej metodą elementów czasoprzestrzennych*

Podstawa oceny: – pismo Przewodniczącej Rady Naukowej dyscypliny „Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport”, Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Bydgoskiej, dr inż. Justyny Sobczak- Piąstka, z dnia 31.03.2023.

Przedmiot, teza i cel pracy

W Rozprawie rozważa się ciała stałe, będące pod wpływem sił, ciepła oraz substancji dyfundującej. Autorkę interesuje jak takie ciała zachowują się, w zadanym przedziale czasowym, czyli jakie powstaną w nich przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia, temperatura i stężenie substancji dyfundującej. Ten obszar badań należy do termodyfuzji sprzężonej.

Zjawisko termodyfuzji występuje w wielu obszarach techniki. W budownictwie są to procesy ciepłno-wilgotnościowe lub ciepłno-chemiczne.

Termodyfuzja pozwala na badanie przepływu masy i ciepła także w sytuacjach ekstremalnych – awariach takich jak pożar czy powódź.

Modele procesów termodyfuzji mogą być molekularne lub makroskopowe. W pracy stosuje się drugi opis. Metoda matematyczna jaką tu zastosowano to formalizm wariacyjny, który pozwala na wygodne przechodzenie od opisu lokalnego zjawiska fizycznego do opisu globalnego i na odwrót. Jest to także wygodne narzędzie do konstruowania nowych modeli.

W rozprawie ciało stałe, w którym występują zjawiska termodyfuzji opisano najpierw lokalnie. Następnie sformułowano wariacyjny opis globalny definiując

funkcjonał czasopracy i rozszerzoną zasadę Hamiltona. Opis globalny pozwolił na skonstruowanie modelu numerycznego opartego na pojęciu elementu czasoprzestrzennego.

Metoda elementów czasoprzestrzennych sformułowana przez Zbigniewa Kączkowskiego, polega na dyskretyzacji obszaru czterowymiarowego na elementy także czterowymiarowe. Metoda ta była rozwijana przez Promotora Rozprawy prof. Adama Podhoreckiego.

Zakłada się, że ciało jest opisane liniowymi związkami geometrycznymi i fizycznymi. W pracy nie rozważa się ośrodków porowatych czy wielofazowych.

Celem pracy jest *opracowanie modelu ciała stałego, geometrycznie i fizycznie liniowego, poddanego działaniu zmiennego w czasie i przestrzeni obciążenia, oddziaływaniom termicznym oraz przepływowi masy, a także sformułowanie algorytmu rozwiązania tego problemu z użyciem metody elementów czasoprzestrzennych.*

Teza pracy: *możliwe jest uzyskanie efektywnego rozwiązania zagadnienia początkowo – brzegowego termodyfuzji sprzężonej w ciałach stałych z użyciem metody elementów czasoprzestrzennych.*

Analiza treści i ocena rozprawy

Praca składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów, wniosków końcowych, spisu literatury (144 pozycji) i liczy 153 strony.

Rozdział pierwszy i drugi mają charakter wprowadzający. Przedstawiono w nich przedmiot, cel i zakres pracy oraz aktualny stan wiedzy odnoszący się do zagadnień termodyfuzji sprzężonej i metody elementów czasoprzestrzennych.

W rozdziale trzecim sformułowano badany problem.

Model ciała materialnego przyjmuje się w postaci klasycznej; konfiguracja ciała jest obszarem w trójwymiarowej przestrzeni Euklidesowej, w ciele występują pola przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, temperatury i stężenia substancji dyfundującej. Na ciało działają obciążenia powierzchniowe, siły masowe, źródła ciepła i dyfuzji.

Temperaturę w ciele opisuje prawo Fouriera a stężenie substancji dyfundującej - prawo Ficka.

Układ równań modelowych przedstawiono klasycznie stosując założenia i metody sformułowane przez Witolda Nowackiego dla procesów termodynamicznych w układach zamkniętych,

Wykorzystuje się w tym podejściu pierwszą i drugą zasadę termodynamiki.

Wprowadzając energię swobodną Helmholtza i rozwijając ją w szereg Taylora w pracy wyprowadzono związki konstytutywne dla naprężeń, entropii i potencjału chemicznego. W związkach tych występują składowe odpowiednich tensorów będących stałymi materiałowymi.

Kolejny krok to wykorzystanie bilansu entropii i wyrażenie jej przez deformacje, dyfuzję i temperaturę.

Rozdział kończy zestawienie otrzymanych równań termodyfuzji sprzężonej. Są to równania równowagi, równania geometryczne, konstytutywne oraz równania rozszerzone przewodnictwa cieplnego i dyfuzji oraz warunki początkowo-brzegowe.

Na str. 23 przyjęto założenia o *umiarkowanej* temperaturze i *umiarkowanym* stężeniu substancji dyfundującej. Proszę o wyjaśnienie jak to należy rozumieć i w których miejscach w dalszych rozważaniach założenia te są wykorzystane.

Rozdział czwarty zawiera opis globalny termodyfuzji.

Autorka na wstępie tego rozdziału stawia tezę, porównując rozwiązania analityczne z rozwiązaniami numerycznymi (a więc przybliżonymi) o *ograniczoności* tych pierwszych: „*rozwiązania analityczne ograniczają się na ogół do dość prostych, elementarnych przypadków*” i dalej z *uwagi na wspomniane ograniczenia obliczeniowe metod analitycznych stosuje się obecnie niemalże wyłącznie metody numeryczne*. Jest to prawda, ale to nie są ograniczenia na rozwiązania analityczne. To efekt bezradności badaczy w znajdowaniu takich rozwiązań analitycznych, czyli ścisłych w rozpatrywanym modelu.

Skoro dla lokalnego sformułowania zagadnienia początkowo-brzegowego termodyfuzji sprzężonej na ogół nie mamy rozwiązania ścisłego to konstruujemy modele przybliżone, uproszczone.

Autorka skonstruowała model numeryczny, którego podstawą jest rozszerzone pojęcia pracy i energii wirtualnej nazwane *czasopracą* i *czasoenergią wirtualną*.

Pojęcia te pozwalają rozszerzyć zasadę Hamiltona na termodyfuzję sprzężoną. To uogólnienie jest autorstwa Doktorantki i Promotora. Trzeba jednak dodać, że ich propozycja nie jest jedyną i problem jest ciągle badany.

Rozdział czwarty jest ciekawy i istotny dla całej pracy. Stanowi podstawę skonstruowanej dalej metody elementów czasoprzestrzennych.

Jest napisany skrótowo, wymagałby uzupełnień. Np. zdefiniowano wariację przemieszczenia, ale nie zdefiniowano wariacji innych funkcji czy funkcjonałów. Dobrze byłoby wyjaśnić czym są wariacje np. funkcji g i h , czym jest wariacja całki we wzorze (4.40), (4.42) czy funkcjonałów w równaniach (4.40) - (4.43). Może w tych ostatnich wzorach wystarczy pierwszy znak równości zamienić na znak tożsamości?

W rozdziale piątym ciągly model termosprężystości sprzężonej poddany jest dyskretyzacji. Oznacza to zdyskretyzowanie równoczesne po czterech wymiarach obszaru czasoprzestrzennego na elementy, następnie przedstawienie wszystkich poszukiwanych funkcji w elemencie w postaci liniowej kombinacji wartości tych funkcji w węzłach oraz funkcji kształtu i wyprowadzenie ze sformułowania globalnego - algebraicznego układu równań. Poszukiwanymi wielkościami w tym układzie są wartości funkcji niewiadomych w węzłach dyskretyzacji.

Opracowany algorytm obliczeń zaimplementowano do własnego programu komputerowego.

Ostatni rozdział zawiera przykłady obliczeń i analizę otrzymanych wyników. Analizuje się pręt prosty z osłoną izolacyjną, pod wpływem obciążenia, ciepła i dyfuzji.

Rozważano drgania podłużne wywołane wymuszeniem kinematycznym. Zbadano wpływ dyskretyzacji na stabilność i dokładność metody, drgania pręta spowodowane siłą poprzeczną, powstanie temperatury i stężenia substancji dyfundującej, oraz działanie źródła ciepła i substancji dyfundującej w pręcie. Otrzymane wyniki, w przyjętym zakresie badań, zweryfikowały zarówno model teoretyczny jak i numeryczny.

Uwagi redakcyjne

Mimo, że praca napisana jest poprawnie znajdują się w niej drobne błędy. Niektóre z nich podaję niżej.

Na str. 49 zdanie: *równia różniczkowe cząstkowe względem zmiennych przestrzennych i czasu* raczej powinno mieć postać: *równia różniczkowe cząstkowe na poszukiwane funkcje zależne od zmiennych przestrzennych i czasu*.

Tamże: *dowolne funkcje przemieszczeń spełniające kinematyczne warunki brzegowe oraz różniczkowalne po zmiennych przestrzennych, jak i po czasie*. W tym zdaniu niepotrzebne jest *oraz różniczkowalne po zmiennych przestrzennych, jak i po czasie*, bo są to przemieszczenia a te są z definicji różniczkowalne do odpowiedniego rzędu.

Na str. 59 używa się sformułowań *układ sprzężonych równań różniczkowych* i *układ sprzężonych równań algebraicznych* - to są pleonazmy (tak jak mokra woda czy wzajemna współpraca).

Dobrze byłoby podać na początku (np. w wykazie oznaczeń), jakie ciągi liczbowe przebiegają indeksy, i, j , itd. Taka informacja pojawia się dopiero na str. 62

Powyższe usterki nie pomniejszają wysokiej oceny merytorycznej pracy.

Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa jest dobrze usytuowana we współczesnym stanie wiedzy z zakresu Inżynierii Lądowej.

Sformułowany cel pracy został osiągnięty:

- Opracowano model ciała stałego, geometrycznie i fizycznie linowego poddanego zmiennym obciążeniom, działaniom termicznym i przepływowi substancji dyfundującej.
- Opracowano program numeryczny rozwiązywania zagadnień początkowo-brzegowych termodyfuzji sprzężonej i przetestowano ten program.

Doktorantka wykazała się dobrym przygotowaniem matematyczno-informatycznym. Ma rozeznanie w aktualnych komputerowych technikach obliczeniowych oraz swobodnie potrafi z nich korzystać.

Skonstruowany model czasopracy wirtualnej dla termodyfuzji sprzężonej, rozszerzenie zasady Hamiltona na zagadnienia początkowo-brzegowe termodyfuzji oraz opracowanie autorskiego programu komputerowego w ramach modelu obliczeniowego metody elementów czasoprzestrzennych są oryginalnym wkładem Doktorantki w termopężyłość.

Przeanalizowane przykłady zagadnień początkowo-brzegowych dla pręta weryfikują model.

Praca poszerza wiedzę o modelowaniu i rozwiązywaniu zagadnień początkowo-brzegowych termodyfuzji sprzężonej.

Stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Magdaleny Sosnowskiej pt. *Modelowanie termodyfuzji sprzężonej metodą elementów czasoprzestrzennych* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim na stopień doktora nauk technicznych w rozumieniu Ustawy. Jednocześnie wnoszę o skierowanie jej do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim i dopuszczenie do publicznej obrony.

Przedstawiona ocena pracy skłania mnie również do sformułowania do Wysokiej Rady wniosku o wyróżnienie Rozprawy mgr inż. Magdaleny Sosnowskiej, w odpowiednim momencie postępowania w przewodzie doktorskim.


Wiesław Nagórko