



Prof. dr hab. inż. Jerzy Banaszek
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Warszawa, 03.02.2017r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kuczyńskiego

p.t. „*Enhancement of Monte Carlo Technique in Absorbing/Emitting Radiating Media for CFD applications*”

I. Ocena wyboru tematyki, celu i zakresu badań

Opiniowana rozprawa doktorska jest pracą teoretyczną podejmującą złożony problem symulacji komputerowej sprzężonych procesów transportu masy i ciepła w mediach optycznie czynnych, tj. emitujących i pochłaniających promieniowanie cieplne, w obecności turbulentnych ruchów konwekcyjnych i reakcji chemicznych w złożonych geometrycznie obszarach. Podstawowym celem przedstawionych w niej badań jest stworzenie efektywnego i wiarygodnego narzędzia obliczeniowego tych procesów oraz ilustracja jego praktycznych zastosowań.

Obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach olbrzymi postęp w rozwoju sprzętu obliczeniowego, metod automatycznej generacji siatek, metod dyskretnego modelowania zjawisk i procesów oraz rozwój algorytmów szybkiego przetwarzania danych (w tym obliczeń równoległych, wykorzystania kart graficznych), doprowadził do powszechnej dziś akceptacji symulacji komputerowej jako jednego z podstawowych narzędzi obliczeniowych inżyniera i badacza. Nastąpił widoczny rozwój koncepcji nowych technologii i terminologii, które wykorzystują symulację komputerową jako główne źródło informacji. Pojęcia takie jak „*wirtualne prototypy*” czy „*wirtualne testowanie*” są coraz powszechniej używane przez inżynierów do analizy pracy nowego urządzenia, pojedynczej konstrukcji czy całego systemu poprzez wiarygodną symulację komputerową. Rozwój ten jest od lat stymulowany przez światowy przemysł lotniczy, samochodowy, odlewniczy i chemiczny, to jest te gałęzie gospodarki, w których choćby częściowe zastąpienie kosztownych i długotrwałych testów laboratoryjnych i prototypowania, przez wykorzystanie relatywnie szybkiego i taniego modelowania wirtualnego, może znacznie przyspieszyć wprowadzenie nowego produktu na rynek, udoskonalić i zoptymalizować technologię.

Współczesne prace nad doskonaleniem metod i algorytmów symulacji komputerowych problemów inżynierskich koncentrują się głównie na dwóch aspektach. Pierwszy dotyczy przyspieszenia procesu obliczeniowego, implementacji dokładniejszych modeli matematycznych i związków konstytutywnych oraz efektywnego połączenia różnych technik w wieloskalowej analizie numerycznej złożonych procesów. Z drugiej strony intensywnie rozwijane są badania nad wykorzystaniem wiedzy, doświadczenia i sprawdzonych metod wirtualnej analizy w nowych aplikacjach inżynierskich.

Zrealizowane przez Doktoranta badania, obejmujące budowę, weryfikację i walidację nowego modelu symulacji komputerowej wysokotemperaturowych procesów cieplnych, opartego na udoskonalonej stochastycznej metodzie śledzenia wiązki promieniowania i jej powiązaniu z klasycznym modelowaniem konwekcji oraz dyfuzji masy i ciepła na siatce objętości kontrolnych, dobrze wpisują się w ten ogólnościowy kierunek badań.

Sprzężone procesy transportu, zwłaszcza w układach spalania w skali przemysłowej, są bardzo złożone ze względu na skomplikowaną turbulentną strukturę przepływu, promieniowanie

w ośrodkach o właściwościach optycznych zależnych od długości fali promieniowania, reakcje chemiczne i przemiany fazowe. Złożony jest też opis matematyczny tych procesów oparty na całkowo-różniczkowym układzie równań, nieliniowych warunkach brzegowych oraz zależnych od temperatury i składu molowego właściwościach termofizycznych i radiacyjnych medium. Budowa symulatora numerycznego tych procesów wymaga więc zaawansowanej wiedzy z zakresu fizyki ośrodków ciągłych, chemii spalania, teorii modelowania matematycznego, metod symulacji komputerowej, programowania oraz wiedzy z zakresu budowy efektywnych algorytmów obliczeniowych.

Tematyka badawcza dysertacji mgr inż. Pawła Kuczyńskiego ma też ważny aspekt aplikacyjny. Procesy sprzężonej konwekcji i promieniowania występują w wielu ważnych zastosowaniach inżynierskich, takich jak technologie odlewnicze, spalanie czy wysoko-temperaturowe procesy obróbki materiałów, a analizy jakościowe i ilościowe tych procesów są podstawą projektowania palenisk, pieców przemysłowych, komór spalania, technologii produkcji kryształów i części odlewanych. Badania eksperymentalne są tu, ze względu na wysokie temperatury i nieprzyjazną atmosferę, bardzo trudne, czasochłonne i kosztowne. Dlatego wiarygodne modele symulacji komputerowej stają się dziś podstawowym, bardzo pożądanym przez inżynierów, narzędziem analizy ilościowej i optymalizacyjnej wysokotemperaturowych procesów i technologii.

Biorąc powyższe pod uwagę, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że Doktorant podjął ambitne i trudne badania, których tematyka ma charakter dysertacyjny i aplikacyjny, jest zgodna ze współczesnymi ogólnoswiatowymi trendami.

II. Walory naukowe, oryginalność badań, ocena metod badawczych i uzyskanych wyników

Opiniowana rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój teorii i zastosowań metod symulacji komputerowej radiacyjnej wymiany ciepła w ośrodkach optycznie czynnych, w szczególności stochastycznej metody Monte Carlo. Osiągnięcia Doktoranta dotyczą zarówno rozbudowy podstaw metody jak i poprawy jej efektywności obliczeniowej.

Poszukując możliwie wszechstronnej metody numerycznego rozwiązania zagadnienia promieniowania w ośrodkach emitujących i absorbujących Doktorant przeprowadził krytyczną ocenę powszechnie stosowanych metod, takich jak S2S, DO, Spherical Harmonics, BEM Discrete Transfer (rozdziały 1 i 3). Na tej podstawie dokonał wyboru metody Monte Carlo – techniki statystycznego próbkowania. Jest ona wolna od numerycznych błędów znanych jako efekt promienia (*ray effect*) oraz sztuczna dyfuzja (*false scattering*), ma prosty kod, może być stosowana przy złożonych warunkach brzegowych oraz dowolnych właściwościach radiacyjnych powierzchni i ośrodka gazowego, a jej podstawowy algorytm śledzenia dużej liczby promieni wysyłanych z powierzchni i elementów objętościowych może być łatwo realizowany w obliczeniach równoległych.

Pierwsze próby wykorzystania metody Monte Carlo do śledzenia promienia – MCRT (Monte Carlo Ray Tracing) podjęto ponad 20 lat temu, stosowano ją w obliczeniach promieniowania z turbulencją, także w ośrodku rozpraszającym w obecności cząstek stałych oraz radiacyjnej wymianie ciepła w ogrzewanych węglem kotłach. Podstawowym niedostatkiem tych modeli była czasochłonność obliczeń wynikająca z zastosowania techniki śledzenia dużej liczby promieni na gęstej siatce podziału przestrzennego - wymaganej do rozwiązania zagadnienia wymiany ciepła w turbulentnym przepływie optycznie czynnego ośrodka. Ten mankament metody MCRT uniemożliwiał jej efektywne zastosowanie w obliczeniach rzeczywistych zagadnień inżynierskich.

Doktorant zaproponował rozprzęgnięcie związku pomiędzy równaniem transportu promieniowania oraz równaniami przenoszenia masy, pędu i energii, a następnie ich sekwencyjne rozwiązanie i iteracyjne uzgadnianie pól prędkości, temperatury i strumieni radiacyjnych. W ten

sposób zbudował efektywny obliczeniowo model symulacyjny, oparty na powiązaniu dwóch odrębnych kodów numerycznych – ogólnie dostępnego programu OpenFOAM do rozwiązania zagadnień mechaniki płynów, wymiany masy i ciepła na nieregularnych siatkach objętości kontrolnych oraz własnego algorytmu i kodu śledzenia wiązki promieniowania metodą Monte Carlo na odrębnej rzadkiej ortogonalnej i regularnej siatce kartezyjskiej.

W realizacji modelu śledzenia promienia radiacyjnego na ortogonalnej siatce kartezyjskiej Doktorant wykorzystał stochastyczną metodę MCRT, w której śledzi się dużą liczbę wiązek promieniowania od miejsca ich emisji do punktu pochłaniania. Obszar dzielony jest na skończoną liczbę regularnych powierzchni i objętości. W każdym z tych elementów zakłada się jednorodne właściwości radiacyjne. Bilans energii promieniowania określany jest przez śledzenie losów wiązek energii emitowanej z każdej powierzchni i każdego elementu objętościowego. Zachowanie wiązki promieniowania, tj. emisję z powierzchni, kierunek emisji, oddziaływanie z półprzezroczystym ośrodkiem, cząstkami stałymi i ściankami, wyznaczane jest przez losowe próbkowanie ze znanymi funkcjami gęstości prawdopodobieństwa. Wykorzystano tu koncepcję RDF-ów (Radiation Distribution Functions, pozycja literatury [76]) - ułamek całkowitej energii emitowanej z elementu „i” i zaabsorbowanej przez element „j” oraz ich związku wzajemności.

Idea śledzenia promienia radiacyjnego na dodatkowej rzadkiej siatce prostopadłościów została zapożyczona z pracy doktorskiej G. Wencla (pozycja [131] wykazu literatury). Wyniki takiej symulacji silnie zależą od rozdzielczości siatki. Musi być ona lokalnie zagęszczana w obszarach, gdzie występują silne gradienty emitowanej mocy lub/i w pobliżu brzegów. Oryginalnym pomysłem Doktoranta jest budowa hierarchicznej siatki i dwupoziomowego algorytmu dyskretyzacji, co zapewnia funkcjonalną kontrolę rozdzielczości siatki i możliwość jej lokalnego zagęszczenia. W celu przyspieszenia procedury śledzenia promienia wprowadzono też podział komórek siatki na aktywne, brzegowe i nieaktywne.

W proponowanym algorytmie śledzenia promienia na rzadszej siatce ortogonalnej bardzo istotny jest dokładny opis powierzchni brzegowych definiowanych na gęstej siatce obliczeń wielkości polowych. Mgr inż. P. Kuczyński zaproponował wykorzystanie funkcji sklepanych o niejednorodnym rozkładzie punktów bazowych (NURBS Non-Uniform Rational Basis Spline), powszechnie stosowanych w grafice komputerowej i programach CAD. Ich użycie umożliwia przybliżanie złożonych kształtów oraz ich matematyczny opis w zwartej formie oszczędzającej pamięć i czas pracy komputera. Jest to oryginalny dorobek Doktoranta – nikt do tej pory nie modelował tak powierzchni w analizie radiacyjnej wymiany ciepła. Ponadto, ponieważ generacja powierzchni NURBS odbywa się niezależnie w sąsiednich komórkach, co mogłoby powodować nieciągłości opisu, w wyborze punktów bazowych Doktorant zastosował procedurę nachodzenia na siebie sąsiednich elementów ortogonalnej siatki kartezyjskiej.

Szczególnie kosztowny jest algorytm poszukiwania przecięcia promienia z powierzchnią modelowaną funkcjami sklepanymi. Parametryczne współrzędne tego punktu wyznacza się z nieliniowego układu równań rozwiązywanego metodą Newtona, której szybkość zbieżności zależy od dobrego pierwszego przybliżenia współrzędnych położenia tego punktu. By przyspieszyć poszukiwanie takiego przybliżenia Doktorant zastosował popularną w grafice komputerowej metodę zamykania obiektów w hierarchicznej strukturze objętości o różnych wielkościach (BVH - Bounding Volume Hierarchy). Natomiast do wyznaczania punktu emisji wiązki promieniowania z wybranej powierzchni lub elementu objętościowego zaadoptował dostępny w literaturze stochastyczny algorytm Kopytova oparty na wyznaczeniu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa znalezienia punktu na fragmencie powierzchni (pozycje [65,66] wykazu literatury).

Efektom realizacji wyżej opisanego algorytmu śledzenia dużej liczby promieni stochastyczną metodą MCRT jest wyznaczenie macierzy funkcji rozkładu promieniowania (RDF) dla wszystkich powierzchniowych i brzegowych elementów siatki podziału. Jej znajomość pozwala na obliczenie

wartości strumieni radiacyjnych oraz objętościowych źródeł/upustów w medium absorbującym i emitującym oraz w obecności kulistych cząstek emitujących promieniowanie - na podstawie związków wynikających z bilansów energii przedstawionych w rozdziale 4 (wzory (4.37), (4.38)). Występujące w tych związkach emisyjności i współczynniki absorpcji dla ośrodka nieszarego wyznaczane są na podstawie modelu WSGGM (Weighted Sum of Gray Gases), gdzie ich całkowite wartości wyrażane są ważonymi sumami właściwości składników, z funkcjami wagowymi zależnymi od temperatury i kompozycji mieszaniny gazowej (G.Wencel, pozycja [131] wykazu literatury). W przypadku obecności cząstek stałych Doktorant zaproponował uproszczony model rozpraszania promieniowania w postaci zastępczego współczynnika absorpcji proporcjonalnego do koncentracji i pola przekroju cząstek stałych zawieszonych w płynie, zwiększającego współczynnik absorpcji gazu. Pozwala to na rozróżnienie temperatur cząstek i otaczającego gazu, co nie było dotychczas możliwe w dostępnych w literaturze modelach.

Proponowany model symulacji sprzężonych procesów transportu masy i ciepła w mediach optycznie czynnych rozwiązywany jest na dwóch niezależnych siatkach dyskretyzacji przestrzennej. Konieczna jest więc dwustronna komunikacja i wymiana danych. By rozwiązać problem promieniowania metodą MCRT na rzadkiej ortogonalnej siatce kartezyjskiej konieczny jest transfer z gęstej nieregularnej siatki objętości skończonych informacji o polu temperatury, kompozycji mieszaniny gazowej, właściwościach radiacyjnych powierzchni, medium i rozproszonej fazy stałej. Doktorant zastosował tu ważne uśrednienia powierzchniowe i objętościowe. Wyniki analizy zagadnienia promieniowania w postaci strumieni na ściankach, radiacyjnych źródeł i upustów w elementach objętościowych rzadkiej dyskretyzacji ortokartezyjskiej, przypisane do środków ciężkości komórek brzegowych i objętościowych, są przenoszone do podstawowej siatki objętości kontrolnych przez liniowe interpolacje.

Mgr inż. P. Kuczyński opracował własne kody rozwiązania zagadnienia promieniowania MCRT oraz dwustronnego transferu danych pomiędzy siatkami dyskretyzacji i dołączył je do powszechnie wykorzystywanego otwartego pakietu OpenFOAM powiększając możliwości jego zastosowań. W celu przyspieszenia obliczeń w metodzie MCRT, gdzie każdy promień może być śledzony niezależnie, przeprowadził częściowe zrównoleglenie kodu wykorzystując biblioteki OpenMP pakietu OpenFOAM.

Na podkreślenie zasługuje przeprowadzenie przez Doktoranta hierarchicznej analizy wiarygodności proponowanego stochastycznego modelu symulacji komputerowej radiacyjnej wymiany ciepła. Weryfikacja dokładności analogu dyskretnego i zgodności jego wyników z modelowaną rzeczywistością jest coraz powszechniej rozumiana jako ostatni, ale jeden z najważniejszych, etapów budowy wirtualnych narzędzi analiz inżynierskich. Mgr inż. Paweł Kuczyński potwierdził bardzo dobrą dokładność stochastycznego modelu śledzenia promieni radiacyjnych w ośrodku optycznie obojętnym przez porównanie współczynnika konfiguracji dla promieniowania między równoległymi płytami prostokątnymi otrzymanego metodą MCRT z dostępnym w literaturze rozwiązaniem analitycznym oraz przez porównanie strumieni radiacyjnych obliczonych metodą MCRT i modelem S2S Ansys Fluent na ściankach sześcianu o różnych zadanych temperaturach. W kolejnym etapie analizy dokładności modelu MCRT Doktorant rozważył dwa przypadki ośrodka szarego absorbującego i emitującego promieniowanie przy znanym przestrzennym rozkładzie temperatury. Do weryfikacji wykorzystał dostępny w literaturze *benchmark* obliczeniowy, którego wyniki opublikowane w literaturze uzyskane zostały przy użyciu różnych metod (takich jak: MC, DO, DT, BEM). W pierwszym przypadku prostopadłościenna komora spalania wypełniona była gazem szarym o stałej temperaturze wyższej od temperatury ścianek. W drugim, szare medium o jednorodnym współczynniku pochłaniania z przestrzennie zmienną temperaturą, imitującą temperaturę płomienia, wypełniało cylindryczną komorę spalania. Uzyskane metodą MCRT strumienie na bocznych ściankach komór były bardzo bliskie wartościom publikowanym w literaturze. Zagadnienie promieniowania w cylindrycznej

komorze spalania Mgr inż. P. Kuczyński wykorzystał do dyskusji błędów „efektu promienia” i „sztucznego rozpraszania” w metodzie kierunków dyskretnych (DO). W tym celu przeprowadził obliczenia modelem DO dla różnych podziałów kątowych i różnych rzędów dyskretyzacji przestrzennej i porównał je z wynikami obliczeń MCRT przy różnych liczbach promieni emitowanych z elementu siatki. Analiza uzyskanych rozkładów strumienia radiacyjnego po obwodzie w wybranych lokalizacjach na długości komory pokazała znaczne, nieuzasadnione fizycznie, oscylacje rozwiązania DO, które można zmniejszyć tylko przy jednoczesnym zagęszczeniu podziału kąтового i podwyższeniu rzędu dyskretyzacji przestrzennej. W rozwiązaniu MCRT nie ma tych błędów, a niewielkie nieregularne oscylacje wynikają ze statystycznej natury modelu i mogą być zredukowane przez zwiększenie liczby emitowanych promieni. W ostatnim etapie hierarchicznej weryfikacji modelu Doktorant przebadął dokładność obliczeń MCRT dla promieniowania w prostopadłościowej komorze spalania o czarnych ściankach wypełnionej mieszaniną gazową o przestrzennym rozkładzie temperatury imitującym temperaturę płomienia. Właściwości radiacyjne medium opisano modelem WSGGM. Obliczone radiacyjne strumienie ciepła wzdłuż centralnej linii jednej ze ścianek i źródła objętościowe wzdłuż osi kanału porównano z dostępnymi w literaturze rozwiązaniami innymi modelami, potwierdzając zadawalającą dokładność metody MCRT (różnice <5%).

Praktyczne wykorzystanie opracowanego modelu symulacji komputerowej sprzężonych procesów transportu promieniowania, masy i ciepła w mediach optycznie czynnych, będącego połączeniem autorskiego kodu metody MCRT oraz pakietu OpenFOAM, Doktorant zaprezentował na dwóch przykładach. W pierwszym przeprowadził analizę ustalonych pól temperatury i strumieni radiacyjnych w procesie azotowania stalowego wału w piecu węglowym. Ze względu na małą grubość optyczną mieszaniny amoniaku i azotu pominięto absorpcję i emisję w gazie. W wyniku przeprowadzonych obliczeń wykazano niepożądaną niejednorodność pola temperatury na powierzchni wału oraz zbyt wysoką temperaturę na zewnętrznej ściance izolacji pieca, dla zapewnienia właściwej jakości produktu zasugerowano użycie odpowiednio dobranych mocy grzałek. Model MCRT wraz z pakietem OpenFOAM zostały też zastosowane do analizy procesu spalania pyłu węglowego w atmosferze powietrza oraz mieszaniny tlenu, pary wodnej i dwutlenku węgla w walcowej komorze spalania. Modelowanie spalania pyłu węglowego jest dużym wyzwaniem bowiem w procesie występuje turbulenta konwekcja, promieniowanie w ośrodku optycznie czynnym, oddziaływanie fazy gazowej z rozproszoną fazą stałą, reakcje chemiczne, odparowanie wilgoci, usunięcie lotnych składników z cząstek węgla. W celu walidacji obliczeń Doktorant porównał uzyskane średnie temperatury w przekrojach wzdłuż osi oraz strumień napromieniowania, a także obrazy prędkości, temperatury, udziału molowego tlenu i dwutlenku węgla z pomiarami na stanowisku laboratoryjnym zaopatrzonego w walcowy piec o mocy 0,5MW, specjalnie zaprojektowany palnik wirowy do spalania pyłu węglowego, termopary oraz analizator FTIR do pomiaru koncentracji gazów. Otrzymał bardzo dobrą zgodność pola temperatur (<3,5%). Istotne rozbieżności wystąpiły w obliczanej i mierzonej koncentracji O₂ w gazach wylotowych, co Doktorant tłumaczy przyjęciem przybliżonego literaturowego modelu kinetyki reakcji.

W podsumowaniu, za znaczące osiągnięcie mgr inż. Pawła Kuczyńskiego uważam opracowanie i realizację koncepcji powiązania dwóch różnych modeli symulacyjnych, tj. stochastycznego modelu radiacyjnej wymiany ciepła w ośrodkach optycznie czynnych i modelu numerycznej analizy zagadnień turbulენტnej wymiany masy, ciepła i składnika w aktywnych chemicznie roztworach. Oryginalne pomysły Doktoranta śledzenia promienia radiacyjnego na hierarchicznej rzadkiej ortogonalnej i regularnej siatce kartezyjskiej oraz wykorzystania stosowanych we współczesnej grafice komputerowej opisów złożonych powierzchni brzegowych funkcjami sklejanymi i losowych algorytmów poszukiwania punktów emisji i przecięcia promienia z powierzchnią znacznie poszerzyły możliwości metody Monte Carlo w zastosowaniach inżynierskich. Łącząc ten model z ogólnodostępnym kodem numerycznego rozwiązania zagadnień

mechaniki płynów i wymiany ciepła na siatkach objętości kontrolnych, Doktorant stworzył nowe, efektywne obliczeniowo, narzędzie symulacji komputerowej rzeczywistych procesów złożonej wymiany ciepła w technologiach i urządzeniach pracujących w wysokich temperaturach, użyteczne dla inżyniera w projektowaniu i optymalizacji komór spalania, pieców, palników, urządzeń redukujących emisję gazów, rozwoju nowej technologii spalania, etc.

III. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Wnikliwa lektura tego obszernego (liczącego 188 stron) opracowania naukowego nasuwa następujące wątpliwości i uwagi o charakterze dyskusyjnym:

1. W rozprawie doktorskiej przygotowanej na prestiżowym wydziale kształcącym w zakresie energetyki i inżynierii środowiska nie powinny zdarzać się błędy i nieścisłości dotyczące podstawowej wiedzy termodynamicznej i wymiany ciepła, takie jak:
 - H na liście symboli i we wzorze (2.6) to nie jest „total enthalpy” ale „specific total enthalpy” bowiem jest to entalpia na kg;
 - w wykazie oznaczeń błędne jednostki lepkości dynamicznej, powinno być $\text{kg}/(\text{m s})$;
 - w podrozdziale (2.2) Autor przedstawia kompleksowy różniczkowy model ruchu płynu, transportu masy i ciepła. Jednoznaczność jego rozwiązania wymaga zdefiniowania warunków brzegowych. Zabrakło tego, zabrakło choćby wspomnienia, że będą analizowane dalej dla konkretnych przypadków, zatem przedstawiony model jest niepełny;
 - Doktorant miesza pojęcia „heat flux” i „heat rate”: np.: na str.46 w zdaniu nad wzorem (4.5) jest „the net radiative heat”; a powinno być „the net radiative heat rate”; w tabeli 6.3 przedstawiono porównanie mocy cieplnych na wybranych powierzchniach, tymczasem Doktorant w ostatnim wierszu na str. 106 pisze „...heat fluxes from Tab.6.3...” - powinno być „... heat rates from Tab.6.3...”;
 - Błędny wzór (6.7) – nie jest on zapisem strumienia konwekcyjnego, ale zmiany entalpii strumienia powietrza chłodzącego - zgodnie z wykazem oznaczeń ze str.V i VI: m , c_p to masa i ciepło właściwe, a jednostką iloczynu przedstawionego we wzorze (6.7) są J , a nie W/m^2 ;
2. W podrozdziale 5.2, w ramach weryfikacji proponowanego modelu MCRT, jego wyniki porównywane są z rezultatami obliczeń zespołu naukowców z Niemiec, którzy także stosowali metodę Monte Carlo (pierwszy wiersz w Table 5.5). Czym różni się ich model od proponowanego w rozprawie? Rozwiązania obu modeli są bardzo bliskie.
3. W podrozdziale 6.1 zaprezentowano wyniki numerycznych obliczeń ustalonych pól temperatury i strumieni radiacyjnych w procesie azotowania stalowego wału w piecu wglębnym. Przeprowadzono je proponowaną metodą MCRT i modelem S2S. W dyskusji uzyskanych wyników Doktorant podsumowuje, że strumienie radiacyjne i średnie temperatury na wybranych ścianach dobrze zgadzają się w obu metodach. Nie pokazuje jednak tego – w pracy nie ma porównania pól temperatury czy strumieni radiacyjnych, a ich pola zaprezentowane na rys. 6.3., i rys.6.4 nie mają przypisanej metody. Czy to oznacza że rozwiązania były graficznie nierozróżnialne?
4. Wątpliwości budzi umieszczenie podrozdziału 6.2 jako części rozdziału *Applications*, który poświęcony jest wykorzystaniu opracowanego modelu symulacji komputerowej w rzeczywistych zagadnieniach inżynierskich. We wspomnianym fragmencie 6.2 dysertacji Doktorant przeprowadza analizę wpływu różnych podziałów kąta bryłowego i dyskretyzacji przestrzennej w metodzie DO na wielkość charakterystycznych dla tej symulacji błędów „ray effect” i „false scattering”, porównuje rozwiązania DO z wynikami metody MCTR przy różnych liczbach promieni emitowanych z elementów siatki orto-kartezjańskiej, pokazuje

zalety lokalnego zagęszczenia tej siatki na dokładność rozwiązania MCTR. Taka analiza błędów jest częścią weryfikacji modelu i powinna być fragmentem rozdziału 5.

5. W analizie błędów „*ray effect*” i „*false scattering*” w metodzie DO (podrozdział 6.2, str 110 - 122) Doktorant używa pojęcia „*order of spatial discretization*” nigdzie nie wprowadzając jego definicji. W metodach numerycznych dyskretyzacja określonego rzędu jest pojęciem szerokim, mogą to być np. schematy różnicowe wyższego rzędu czy techniki *pod prąd*, etc. Jak należy rozumieć dyskretyzację wyższego rzędu na siatkach objętości kontrolnych - kluczowy parametr w przedstawionej w podrozdziale 6.2 analizie błędów?
6. Komentarza wymaga przedstawiona w części 6.3 pracy analiza walidacyjna wyników symulacji procesu spalania pyłu węglowego, symulacji opartej na modelu MCRT w powiązaniu z kodem OpenFOAM. Dokonano jej wykorzystując wyniki pomiarów uzyskanych na istniejącym stanowisku laboratoryjnym, zaprojektowanym dla poznania fizyki i chemii procesu spalania różnorodnych paliw w atmosferze różnych utleniaczy. Nie było to więc stanowisko przystosowane do walidacji modelu. W szczególności nie było możliwe uzyskanie danych o rzeczywistych warunkach brzegowych od których silnie zależą wyniki symulacji numerycznej. Niepewność warunków wymiany ciepła w szczelinie pomiędzy izolacją komory i wewnętrzną ścianką obudowy zmusiły do przyjęcia założeń wielkości strumienia masy powietrza chłodzącego oraz kalibracji modelu na podstawie wyników doświadczeń. W tak złożonych procesach jest to pewnie jedyna metoda, ale konieczna jest też świadomość, że tak przeprowadzona walidacja jest tylko częściowa, bowiem ten sam eksperyment został wykorzystany w modelowaniu warunków wymiany ciepła.

IV. Uwagi dotyczące redakcji pracy.

Wysoko należy ocenić staranną redakcję rozprawy, w tym w szczególności jej grafikę. W tak obszernej pracy Autor nie ustrzegł się jednak drobnych niedociągnięć redakcyjnych, ważniejsze z nich przedstawia poniższa lista:

- stosowanie tych samych oznaczeń dla dwóch, a często i większej liczby różnych zmiennych / parametrów, np. E,g,k,m,p, ϵ , Ω , etc.;
- Autor stosuje skrócone nazewnictwo nie wyjaśniając znaczenia niektórych skrótów literowych (nie ma ich także w wykazie oznaczeń), np. BSP-tree, KD-trees na str.5, IGES na str.59;
- tytuł podrozdziału 1.2.2 jest dziwny. Monte Carlo to nazwa własna dzielnicy Monaco. Chyba bardziej właściwe byłoby zatytułować tę część rozprawy „*Monte Carlo Method in radiative heat transfer*”;
- oznaczenia osi na rys. 2.3 są niezgodne z przyjętym w wykazie symboli - x i z mają inne znaczenie, nie są to osie układu;
- na str. 15 w zdaniu nad wzorem (2.16) błędny numer wzoru – jest ‘in (2.1.2)’, a powinno być ‘in (2.14)’;
- Literówki, pominięte słowa: str. 20, druga linia od dołu: powinno być „depends”; str.40, ostatnia linia w drugim od dołu akapicie: jest „form” powinno być „from”; str.42, 12 wiersz od dołu: jest „though” powinno być „through”; str.76, wiersz nad wzorem (4.71): jest „filed” powinno być „field”; str. 110, ostatni wiersz w drugim od góry akapicie: jest „form” powinno być „from”; str.118, pierwszy wiersz ostatniego akapitu: jest „rcall” powinno być „recall”; str.134, trzeci wiersz od dołu: jest „can explained”, powinno być „can be explained”; str. 165, piąty wiersz od dołu: jest „have to firstly ...”, powinno być „have to be firstly...”; str.187, trzeci akapit od góry: jest „... wit gray gray ..”, powinno być „...with gray..”;
- Str.126, trzeci akapit od dołu: słowo „widens” powinno być zastąpione przez „contracts”;

- Str.131, Table 6.10: zamienione udziały molowe tlenu i azotu w „Primary Oxidant”;
- Str.66, wiersz nad wzorem (4.50)- błędne odwołanie do wzoru (4.43), powinno być do (4.44);
- Nie wszystkie wartości w Table 6.4 odpowiadają wartościom ze wzoru (6.1);
- Str.166 i 167: licznik ułamka w języku angielskim to „numerator” a nie „nominator”.

V. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska ma walory naukowe i aplikacyjne. Jej tematyka została zainspirowana rzeczywistą potrzebą ciągłego udoskonalania modeli komputerowej symulacji złożonych zjawisk wymiany ciepła i masy, reakcji chemicznych i przemian fazowych oraz bazujących na nich wysokotemperaturowych procesów technologicznych, w celu stworzenia efektywnego i wiarygodnego narzędzia obliczeniowego wspomagającego projektowanie i optymalizację nowych systemów i technologii. Realizując ambitny i obszerny program budowy, weryfikacji i praktycznej walidacji nowego modelu symulacji komputerowej wysokotemperaturowych procesów cieplnych, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązania trudnego zagadnienia naukowego oraz szeroką i rzetelną wiedzą z zakresu: metod probabilistycznych, teorii i metod numerycznych mechaniki płynów i wymiany ciepła, termodynamiki chemicznej, metod i algorytmów grafiki komputerowej, zaawansowanego programowania w języku C++ oraz algorytmów realizacji obliczeń równoległych.

Zauważone w rozprawie drobne niedociągnięcia dotyczą głównie redakcji pracy, nie zmieniają więc mojej wysokiej oceny zrealizowanych badań i sylwetki naukowej Kandydata.

Dlatego z przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Kuczyńskiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez *Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki* z dnia 14 marca 2003 roku i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

