|  |  |
| --- | --- |
| dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni  Politechnika Warszawska,  Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa,  Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,  ul. Nowowiejska 24, 00-665, Warszawa  tel : +48.22.234.47.77, fax: +48.22.622.09.01  e-mail : slawomir.kubacki@pw.edu.pl | Warszawa dn. 30 września 2023 r. |

**Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Pana mgr Michała Górkiewicza**

**pt. „Development of Localized Coupled Neutronic and CFD Calculation for HTR Application”**

1. **Podstawa opracowania**

Niniejsza recenzja została sporządzona na zlecenie Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Otwocku, 05-400, ul. Andrzeja Sołtana 7, na podstawie umowy zawartej w dn. 11 lipca 2023 r.

1. **Ogólna charakterystyka rozprawy**

Przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska Pana mgr Michała Górkiewicza dotyczy opracowania zredukowanej i wydajnej obliczeniowo metody służącej do symulacji numerycznej procesów, zachodzących w wybranych elementach rdzenia wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem, oraz analizy tych procesów. Zjawiska fizyczne zachodzące w rdzeniu reaktora cechują się dużą złożonością. Dotyczą one z jednej strony procesów rozszczepiania jąder atomowych, ich rozpraszania i absorpcji, i z drugiej strony procesów wymiany ciepła jaka ma miejsce z złożonej strukturze rdzenia reaktora oraz wymiany ciepła i pędu jaka zachodzi w obiegu chłodziwa. Procesy zachodzące w rdzeniu reaktora cechują się bardzo różnymi skalami czasowymi. W przypadku neutroniki, czy procesów dyfuzji i dysypacji lepkościowej zachodzących w gazach są to mikroskale mierzone na poziomie oddziaływań atomów czy cząsteczek. Z drugiej strony, praca reaktora liczona jest w miesiącach i latach. Praca doktorska Pana mgr Michała Górkiewicza była więc dużym wyzwaniem. Wymagała opanowania skomplikowanych technik obliczeniowych i opracowania nowej metody, która pozwoliłyby na poprawne modelowanie złożonych zjawisk fizycznych. Neutronika i zjawiska cieplno-przepływowe zwyczajowo modelowane są z zastosowaniem różnych technik obliczeniowych. W przypadku neutroniki są to metody Monte Carlo, w przypadku analiz cieplno-przepływowych są to w zasadzie metody obliczeniowe mechaniki płynów, uzupełnione tam gdzie jest taka potrzeba, metodami z zakresu mechaniki strukturalnej. Sprzężenie tych dwóch/trzech bardzo różnych technik obliczeniowych było bardzo dużym wyzwaniem, bo metody te wykazują bardzo różne cechy w zakresie dokładności obliczeń, czy stabilności procesu obliczeniowego. Doktorant musiał poznać w bardzo dobrym stopniu ww. techniki, w celu ich późniejszego zintegrowania w jeden wspólny program obliczeniowy. W mojej ocenie zadanie to zostało wykonane.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr Michała Górkiewicza wnosi istotny wkład w rozwój narzędzi obliczeniowych służących do realizacji sprzężonych analiz z zakresu neutroniki i procesów cieplno-przepływowych. Autorowi udało się wykonać symulacje i poprawnie wykonać analizy złożonych procesów fizycznych zachodzących w rdzeniu wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem oraz opracować zredukowaną metodę, będącą połączeniem metody Monte Carlo (neutronika) i opensourcowego programu OpenFOAM (analizy cieplno-przepływowe). Praca doktorska Pana mgr Michała Górkiewicza wnosi istotny wkład w rozwój energetyki jądrowej.

1. **Struktura pracy i ocena wartości naukowej**

Praca doktorska składa się z 7 rozdziałów i obejmuje 80 stron. Autor powołuje się na 50 pozycji literaturowych.

W rozdziale 1 przestawione zostały krótko informacje dotyczące zastosowań wysokotemperaturowych reaktorów chłodzonych gazem (ang. high-temperature gas-cooled reactor HTGR) oraz stosowanego w tych reaktorach paliwa jądrowego w postaci kulek TRISO (ang. tristructural-isotropic). Podsumowane zostały również, w bardzo zwięzły sposób, techniki numeryczne i programy komputerowe wykorzystywane w pracy. Metody numeryczne to metoda „Monte Carlo”, która posłużyła do modelowania neutroniki (programy MCB i Serpent). Kolejna to metoda objętości kontrolnych (program OpenFOAM), która powszechnie stosowana jest do dyskretyzacji równań Naviera-Stokesa, równania ciągłości i/lub energii. Analizy cieplno-przepływowe realizowane były z zastosowaniem programu OpenFOAM, który należy do metod obliczeniowcach mechaniki płynów (ang. computational fluid dynamics, CFD). Doktorant wskazał również program „Serpent” jako użyteczne narzędzie, wyposażone oprócz metody Monte Carlo, w rozbudowany mechanizmem wymiany informacji pomiędzy solwerami. Ten mechanizm wymiany informacji umożliwia połączenie ze sobą programów OpenFOAM i metody Monte-Carlo. Doktorant przywołuje również kod POKE, służący do realizacji obliczeń cieplno-przepływowych, nie wyjaśniając jednak znaczenia tej nazwy. Dodatkowo, referencja [38] na którą powołuje się Doktorant, opisując kod POKE, nie jest powszechnie dostępna, co utrudnia recenzentowi zapoznanie się z tą techniką.

Następnie, przedstawiony został cel pracy. Celem pracy było opracowanie techniki obliczeniowej, będącej połączeniem metod służących do analiz neutroniki i CFD oraz zastosowanie jej do analiz pracy rdzenia wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem (geometria w postaci pryzmy).

Sformułowano następującą tezę pracy:

„**Połączenie funkcjonalności narzędzi numerycznych służących do modelowania neutroniki i CFD (OpenFOAM), może stanowić alternatywę dla kompleksowych analiz realizowanych dla całego rdzenia reaktora z pomocą metod MCB i POKE. Analizy wykonane w mniejszej skali, mogą pozwolić na zwiększenie rozdzielczości obliczeniowej w wybranych punktach układu (detekcja „hot spots”) i uwzględnić wpływ przepływów wtórnych w chłodziwie na badane procesy.”**

W rozdziale 2 przedstawiono zasadę konstruowania jednostek paliwa jądrowego w postaci kulek TRISO. Zasadniczym elementem kulek TRISO (średnia ok. 0.5-1mm), jest materiał rozszczepialny znajdujący się w jądrze. Materiał ten otoczony jest czterema warstwami materiału osłaniającego, składającego się z porowatego węgla pirolitycznego, warstwy zwartego węgla pirolitycznego, warstwy ceramicznej utworzonej z węglika krzemu i warstwy węgla pirolitycznego. Warstwy osłaniające pochłaniają gazy wydobywające się w procesie rozszczepienia, pozwalają utrzymać wysoką wytrzymałość mechaniczną kulek na ścieranie oraz utrzymują ograniczony poziom rozszerzalności termicznej paliwa. Doktorant nieprawidłowo zapisał jednostkę, definiując średnicę kulek TRISO równą 500-1000 m. Wymiar ten powinien być podany oczywiście w μm. Następnie, Autor w zwięzły sposób przedstawia przegląd wybranych instalacji reaktorów wysokotemperaturowych chłodzonych gazem w Stanach Zjednoczonych, Zjednoczonym Królestwie, Niemczech, Japonii i Chinach. Istnieją 2 podstawowe instalacje tych reaktorów różniące się typem rdzenia: ze złożem usypanym (ang. pebble bed) i w postaci pryzmy. Te ostatnie są przedmiotem badań Doktoranta. Następnie przedstawione są podstawowe informacje o własnościach i roli grafitu, stanowiącego moderator w ww. instalacjach oraz o procesie rozszczepiania jąder atomowych.

W rozdziale 3 przedstawiono przebieg obliczeń realizowanych dla pełnej konfiguracji wysokotemperaturowego reaktora chłodzonych gazem realizowanych z pomocą dwóch programów. Pierwszy z nich wykorzystywał metodę Monte-Carlo Continuous Energy Burn-up (MCB) służącą do symulowania trajektorii jąder atomowych w rdzeniu reaktora. Obliczenia te uwzględniały procesy łańcuchowej reakcji rozszczepienia jąder, ich rozpraszania i absorbcji. Drugi program o nazwie POKE, służył do analiz termicznych. Program POKE, w oparciu o rozkłady mocy dostarczane przez program MCB, był w stanie wyznaczyć pole temperatur w rozpatrywanym układzie rdzenia reaktora. Przedstawiony został sposób wymiany informacji między ww. solwerami.

W rozdziale 4 przedstawione zostały wyniki obliczeń neutroniki oraz wyniki analiz cieplno-przepływowych uzyskanych z zastosowaniem programów komputerowych MCB i POKE. Moim zdaniem w tym rozdziale zostały przedstawione najciekawsze wyniki badań Doktoranta. Obliczenia były przeprowadzone dla modelu rdzenia rektora o nazwie „Go\_HTR”, opracowanego przez zespół badawczy z AGH w Krakowie. Celem tych prac było opracowanie mechanizmu sterowania pracą rdzenia reaktora HTGR, przy pomocy prętów kontrolnych i uzyskanie stabilnej pracy reaktora (obniżenie fluktuacji krzywej mocy). W rozdziale 4.1 przedstawiono w zwięzły sposób zasadę działania metody Monte Carlo. Metoda ta oprócz ww. procesów transportu, rozproszenia, absorpcji czy procesu rozszczepienia jąder atomowych, jaka ma miejsce w całej dziedzinie obliczeniowej, pozwala zebrać również informacje statystyczne tj. stopień reakcji czy rozkłady strumieni wybranych wielkości. Warto podkreślić, że „udział” procesów fizycznych (rozproszenie, absorbcja czy rozszczepienie) jakie mają miejsce w rzeczywistości był ustalany w obliczeniach na podstawie danych statystycznych udostępnianych programowi w wybranych przekrojach prętów. Metoda ta pozwala również na wyznaczenie miar statystycznych uzyskiwanych wyników tj. niepewności czy poziom zaufania.

Badany układ ma złożoną strukturę geometryczną. Rdzeń reaktora składa się z 240 podobszarów w których realizowane jest spalanie paliwa jądrowego: 10 w kierunku radialnym i 24 w kierunku osiowym. Pręty paliwowe, obejmują tylko część ww. podobszarów, wypełniając przestrzeń w taki sposób, że 1/3 wysokości stanowią pręty, pozostałe 2/3 stanowi grafit (moderator). Kulki TRISO znajdujące się w prętach paliwowych, modelowane były z zastosowaniem regularnej siatki, jak zostało to przedstawione na rys. 7. W rdzeniu reaktora znajdują się również pręty kontrolne, składające się z węglika boru (cześć wewnętrzna pręta) i wolframu (część zewnętrzna). Pręty kontrolne zostały umieszczone w rdzeniu reaktora wg. pewnego schematu, który Doktorant szczegółowo przedstawił (grupy A,B,C i D). Oprócz prętów kontrolnych w rdzeniu znajdują się również pręty w których znajduje się wypalająca się trucizna reaktorowa (ang. burnable poison). Struktura rdzenia reaktora w kierunku radialnym została pokazana na rys. 8. W pierwszej kolejności, kontrolę pracy reaktora przedstawiono wg. schematu przedstawionego w Tabeli 5. Przedział czasowy obejmujący 368 dni podzielono na 4 okresy: odpowiednio od czasu zero do 113 dni (1 okres), od 113 do 193 dni (2 okres), od 193 do 273 dni (3 okres) i od 273 do 368 dni (4 okres). W tych czterech okresach czasu realizowano proces stopniowego usuwania prętów kontrolnych z rdzenia reaktora, odpowiednio dla grup A,B,C i D w ten sposób, że pod koniec wybranego okresu usunięto 100% prętów kontrolnych z danej grupy. Na rys. 9 przedstawiono rozkłady mocy i temperatury w czynnej części reaktora po usunięciu prętów kontrolnych. Doktorant nie precyzuje czy wynik ten został uzyskany po usunięciu wszystkich prętów kontrolnych, czy po usunięciu prętów z wybranej grupy A,B,C lub D. Wyjaśnienia dotyczące rozkładów mocy są przekonywujące, jednak na rys 9b obserwuje się duży poziom temperatury (ok. 1300K) w dolnej części reaktora, który nie został do końca wyjaśniony przez Kandydata. Kandydat wspomina na str. 43 o „sprzężeniu temperaturowym” i konieczności wykonania analiz cieplno-przepływowych. Rozumiem, że wyniki prezentowane na rys 9 były uzyskane bez uwzględnienia wymiany ciepła? Myślę, że w celu zwiększenia przejrzystości pracy należało podać więcej szczegółów dotyczących solwera POKE, który służył do obliczenia pola temperatury w badanym układzie (model matematyczny). Z opisu bezpośrednio nie wynika, czy solwer POKE pozwalał również na symulację przepływu helu w kanałach chłodzących.

Na rys. 10 (a) przedstawiono zmianę mocy reaktora w kierunku osiowym i radialnym obserwowaną w badanym okresie czasu liczącego 368 dni. Logiczne wydają się również zmiany udziału izotopu ksenonu Xe-135 obserwowane na rys. 10 (a). Moim zdaniem, dyskusja zmian ksenonu Xe-135, powinna być jednak poprzedzona wyjaśnieniem przyczyny pojawienia się tego izotopu w badanym układzie. W badanym okresie czasu dokonano całkowitego usunięcia prętów kontrolnych w grupach A,B,C i D. Pierwsza grupa prętów (A), znajdująca się na zewnętrznej części reaktora (daleko od osi), została całkowicie usunięta w 113 dniu. Jak wskazuje Doktorant, pręty te były usuwane od dołu. Skutkowało to sukcesywnym przesuwaniem mocy reaktora, w okresie od 40 do 113 dnia (rys. 10 a), w kierunku dolnej części rdzenia. Wynik ten wydaje się logiczny, bo jak wskazuje Doktorant, usunięcie prętów kontrolnych na dole rdzenia powoduje później zwiększoną intensyfikację procesu wypalania paliwa jądrowego w tych właśnie obszarach. Jednak wyniki uzyskane dla dni 193 i 273, odpowiadających 100% usunięciu w tych dniach prętów kontrolnych z grupy B i C, wydają się mieć inny charakter. W przeciwieństwie do wyniku uzyskanego dla 113 dnia, obserwuje się tutaj zwiększenie przesunięcia mocy rdzenia do jego górnej części (współczynniki są większe od 1). Dlaczego tak jest? Doktorant nie wyjaśnia jaka jest przyczyna tych różnic. Doktorant stwierdza, że oscylacje mocy rdzenia w badanym okresie czasu są jednak duże (+- 30% wartości nominalnej). W kolejnym etapie, Kandydat postanawia zmienić strukturę prętów kontrolnych dodając, kolejne warstwy jak rozumiem złożone z węglika boru w wewnętrznym obszarze prętów (po ich obwodzie). Wyniki eksperymentu numerycznego z udziałem nowo opracowanych prętów przedstawiono na rys. 13 (a). W tekście (str. 44) nieprawidłowo zaznaczono odniesienie do rys. nr 13. Jednak w tym przypadku (Tabela 7) scenariusz usuwania prętów kontrolnych, lub jego fragmentów, jest inny niż poprzednio. W przypadku prętów kontrolnych z grupy A w dniu 25 usunięto w całości warstwę nr I, w dn. 65 usunięto w całości warstwę nr II, następnie w dniu 93 usunięto warstwę III itd. Podobny scenariusz usuwania warstw realizowany był dla prętów z grup B,C i D. Wyniki zmian mocy, zaprezentowane na rys. 13 (a) wskazują znaczne zmniejszenie fluktuacji w badanym okresie czasu (+- 10%) w porównaniu z fluktuacjami obserwowanymi dla poprzednio badanej konfiguracji (rys. 10 a). Doktorant nie wyjaśnia dlaczego dokonał, takich, a nie innych, zmian w strukturze prętów kontrolnych? Jaki był cel wykonania tych zmian w strukturze prętów? Nie jest również jasne czy z technologicznego punktu widzenia możliwe jest przyjęcie scenariusza pracy układu zaprezentowanego w Tabeli 7 (usuwanie warstw I,II, III itd).

W rozdziale 5 przedstawione zostały wyniki symulacji numerycznych sprzężonej wymiany ciepła uzyskane przy pomocy oprogramowania OpenFOAM. Do analiz przyjęto geometrię w postaci połowy pojedynczego pręta paliwowego (zakładając warunki symetrii w płaszczyźnie przechodzącej przez oś pręta), rdzenia wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem. Na początku rozdziału 5 założono, że analizowany gaz (hel) jest płynem ściśliwym (str. 49). W pracy nie znaleziono jednak informacji o liczbie Macha. Znajomość liczby Macha pozwoliłaby ustalić czy analizowany płyn był rzeczywiście ściśliwy. Być może należało przyjąć inny model gazu. Dalej, w rozdziale 5.1, Doktorant w zwięzły sposób przestawia informacje o równaniach różniczkowych, które w analizach CFD należy rozwiązać. Nie definiuje jednak tych równań w pracy. Przedstawione są bardzo ogólne informacje na temat możliwych zastosowań w analizach CFD różnego rodzaju typów siatek obliczeniowych (strukturalne vs. niestrukturalne), sposobów dyskretyzacji równań różniczkowych (metody różnic skończonych, metody objętości kontrolnych, metody elementów skończonych), solwerów i typów warunków brzegowych. Nie zostały jednak sprecyzowane schematy dyskretyzacji równań, które stosowane były w pracy. Nie został przedstawiony model matematyczny badanego układu, ani od strony płynu, ani od strony struktury. Nie znalazłem w pracy informacji o wartości liczby Reynoldsa dla badanego przepływu (gazem był hel). Trudno jest więc jednoznacznie stwierdzić, czy przyjęty model matematyczny przepływu jest prawidłowy. Zastosowano model k-omega SST. Z reguły przepływy w reaktorach jądrowych charakteryzują się dużą liczbą Reynoldsa, tak więc założenie turbulentnego charakteru przepływu mogło być rzeczywiście uzasadnione. Modele bazujące na uśrednionych w czasie równaniach Naviera-Stokesa (ang. Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) wykazują duże ograniczenia nawet w przypadku analiz prostych przepływów tj. przepływ w rurze czy w kanale pierścieniowym. Wybór takiego czy innego modelu RANS do symulacji przepływu i wymiany ciepła powinien być więc poprzedzony walidacją wybranych modeli w oparciu o dostępne wyniki badań eksperymentalnych lub numerycznych wykonanych metodami wyższego rzędu dokładności dla podobnej geometrycznie konfiguracji. Jest to szczególnie istotne bo obciążenia cieplne po stronie chłodziwa są niejednokrotnie większe niż te obserwowane po stronie struktury (patrz rys. 20). Nie znalazłem niestety walidacji modelu RANS w pracy Doktoranta. W rozdziałach 5.2-5.3 pokazano przyjęte w pracy współczynniki przewodności cieplnej i wartości ciepeł właściwych (zależnych od temperatury) dla badanych materiałów/płynu (grafit, porowaty grafit, węgiel pirolityczny, hel, itd.). Dokonano uproszczenia struktury rdzenia paliwowego w którym znajdowały się kulki TRISO, przyjmując zastępczą gęstość „ciągłej” struktury, w oparciu o udziały masowe poszczególnych składników (Tabela 8). Taki stopień uproszczenia wydaje się być uzasadniony, biorąc pod uwagę złożoność siatki obliczeniowej jaka byłaby wymagana w przypadku symulacji procesów termicznych zachodzących w kulkach TRISO i w ich otoczeniu w programie OpenFOAM. Następnie w rozdziale 5.4 przedstawione zostały warunki brzegowe jakie przyjęte zostały do analiz numerycznych w badanym układzie. Typy przyjętych warunków brzegowych i dokonane uproszczenia są moim zdaniem prawidłowe. Pole temperatury na zewnętrznej powierzchni grafitowej osłony i warunki brzegowe dla ciśnienia i temperatury na wlotach i wylotach do/z domeny gazowej zostały przyjęte na podstawie analiz wykonanych wcześniej przy pomocy innego programu (POKE). W rozdziale 5.4 przy opisie warunków brzegowych znalazło się wiele terminów technicznych (inletOutlet, zeroGradient – str 55, compressible::turbulentTemperatureRadCoupledMixed, compressibe::turbulentTemperature, str 56 i in.) pochodzących z programu obliczeniowego. W pracy doktorskiej tego typu określenia techniczne, dotyczące metod, modeli, czy funkcji znajdujących się w programie obliczeniowym nie powinny się znaleźć. Na str. 56, Autor porównuje uzyskane wyniki rozkładu temperatur wzdłuż promienia badanego pręta paliwowego z wynikami analitycznymi. Zgodność jest dobra, jednak nie zostały przedstawione równania które posłużyły do wygenerowania rozwiązań analitycznych. W szczególności nie zostały zdefiniowane człony źródłowe które mogą znaleźć się na prawej stronie równania Poissona (rozwiązanie dokładne). Trudno jest więc stwierdzić, czy uzyskana zgodność wyników numerycznych z analitycznymi jest w tym przypadku pożądana. Na rys. 19 przedstawiono rozkłady temperatur w kierunku osiowym, uzyskane wzdłuż wybranych przekrojów modelowanych elementów pręta paliwowego (struktura i płyn). W obszarze objętym przez paliwo i grafit obserwuje się znaczący spadek temperatury na początku i końcu pręta (rys. 19). Spadek temperatur wydaje się być mało fizyczny. Warto byłoby ustalić w jakim stopniu rozkład ten może zależeć od typów warunków brzegowych przyjętych dla pola temperatury (adiabatyczna ścianka lub niewielki strumień ciepła). Na str. 57, Doktorant pisze, że rozkłady temperatur zaprezentowane na rys. 19 dla paliwa, zostały pokazane wzdłuż osi, podczas gdy te przekroje znajdują się daleko od osi (wzdłuż stałej wartości promienia r). Prawdopodobnie Doktorant miał na myśli kierunek osiowy, a nie oś. Wyniki analiz numerycznych zaprezentowane na rys. 20 (rozkład temperatur) i 21 (rozkład ciśnień wzdłuż przepływu) wydaję się być logicznie spójne i prawidłowe. Na rys. 20 jest błędny opis pod rysunkiem.

Następnie, w rozdziale 6 zostały przedstawione wyniki analiz numerycznych neutroniki z wykorzystaniem metody Monte Carlo zaimplementowanej w kodzie Serpent. Kod Serpent został rozwinięty w VTT Technical Research Centre w Finlandii. Kod ten ma duże możliwości związane z włączeniem do analiz neutronicznych wyników analiz cieplno-przepływowych uzyskanych przy pomocy innych programów. Możliwe jest to dzięki rozbudowanemu mechanizmowi wymiany informacji w programie Sorpent. Prawdopodobnie te cechy programu Serpent skłoniły Doktoranta do wykonania kolejnych analiz numerycznych neutroniki oraz wymiany ciepła z wykorzystaniem kodów Serpent i OpenFOAM. Jednak jakość przedstawionych wyników w tym rozdziale jest znacznie gorsza od tej która została przedstawiona wcześniej w rozdziale 4. W rozdziale 6.1, Doktorant krótko scharakteryzował możliwości kodu Serpent. W rozdziałach 6.1.1, 6.2, 6.2.1 przedstawione są techniczne szczegóły wymiany informacji pomiędzy dwoma solwerami, oraz informacje związane z doborem podobszarów (nazywanych „bins”) do interpolacji rozwiązań z solwera Monte Carlo do OpenFOAMa. Te techniczne szczegóły mogły być przedstawione w załączniku do pracy. Rezultaty są bardzo zwięźle przedstawione w rozdziale 6.3. Autor nie analizuje szczegółowo uzyskanych wyników, nie przedstawia wniosków, co znacząco obniża poziom pracy. Na rys. 27 i 28 pokazane są rozkłady mocy w kierunkach radialnym i osiowym dla analizowanego pręta paliwowego. Nie zostały wyjaśniony charakter zmian tych wielkości. Autor zwraca uwagą, zresztą słusznie, na dużą niepewność uzyskanych wyników obliczeń w solwerze OpenFOAM przy braku uśredniania wyników przy pomocy podobszarów pokazanych na rys. 23. Niepewności są rzędu 95%. Nie znalazłem jednak wyjaśnienia w jaki sposób liczona jest niepewność. Wyniki ulegają poprawie przy zastosowaniu interpolacji w postaci podobszarów. Na rys 29 i 30 pokazano profile temperatury w kierunku osiowym uzyskiwane w programie OpenFOAM przyjmując stałą wartość mocy w obszarze paliwa i lokalnie zmienną uzyskiwaną z solwera Serpent (sprzężenie z neutroniką). Różnice między tymi wynikami nie są duże.

W rozdziale 7 znajduje się podsumowanie uzyskanych w pracy wyników.

1. **Szczegółowe pytania do Autora rozprawy**

W niniejszym rozdziale znajdują się szczegółowe pytania adresowane do Autora rozprawy:

1. Proszę o wyjaśnienie spełnienia, lub nie, hipotezy badawczej zamieszczone na str. 22? Nie znalazłem wyjaśnienia tego zagadnienia w tekście rozprawy.
2. Proszę o informację w jaki sposób kulki TRISO były modelowane w programie MCB podczas symulacji spalania paliwa jądrowego w rdzeniu reaktora „Go\_HTR”. W pracy jest informacja, że kulki te modelowane były poprzez zastosowanie regularnej siatki (rys. 7). Jaki był stopień szczegółowości opisu parametrów tych kulek w analizach z zastosowaniem metody Monte Carlo i jaki to miało wpływ na wynik ?
3. W jaki sposób metoda Monte Carlo która zastosowane była w rozdziale 4 uwzględniała tempo zmian produkcji izotopu ksenonu Xe-135 w rdzeniu reaktora? Proszę o wyjaśnienie przyczyny pojawienia się izotopu ksenonu Xe-135 w układzie reaktora dla analiz prezentowanych na rys. 9 i 10. Nie zostało to w pracy wyjaśnione.
4. Na rys 9b obserwuje się duży poziom temperatury (ok. 1300K) w dolnej części rdzenia. Proszę o wyjaśnienie z czego wynika tak duża różnica w wartościach temperatur między górną i dolną częścią rdzenia, przy dosyć „symetrycznym” rozkładzie mocy (rys. 9a)?
5. Proszę o wyjaśnienie dlaczego w drugim etapie modelowania pracy rdzenia reaktora „Go\_HTR” dokonano zmiany struktury prętów kontrolnych (rozdział 4.3). Jaki cel przyświecał tym zmianom? Nie jest również jasne czy z technologicznego punktu widzenia możliwe jest przyjęcie scenariusza pracy układu zaprezentowanego w Tabeli 7 (usuwanie warstw I,II,III itd.). Proszę o wyjaśnienie celu wprowadzonych zmian i dyskusję funkcjonalności tego układu.
6. Proszę o informację o liczbie Macha i liczbie Reynoldsa jakie uzyskiwane były w przepływie helu (szczelina + obieg chłodziwa) w analizach numerycznych prezentowanych w rozdziale 5. Czy te liczby podobieństwa miały wpływ na wybór modelu gazu i wybór modelu turbulencji? Jeżeli tak, to jaki?
7. Na rys. 18 pokazany jest rozkład temperatury w kierunku radialnym pręta paliwowego. Obserwuje się bardzo duży spadek temperatury (spadek ok 80K) dla cienkiej warstwy helu znajdującej się w odległości r=0.013 m od osi. Różnica temperatur jest dużo większa niż ta w obszarze paliwa. Podobnie, bardzo duży spadek temperatury (ok 200K) obserwuje się dla szczeliny z helem dla r=0.013 m na rys 20. Duży spadek temperatur rejestrowany jest również dla chłodziwa w zakresie r=0.017-0.021 m. Różnica temperatur porównywalna jest tutaj z ta obserwowana dla paliwa. Proszę o wyjaśnienie roli modelu turbulencji i siatki obliczeniowej, w kształtowaniu tak dużych obciążeń cieplnych, na niewielkim „elemencie” pręta paliwowego jakim jest szczelina i dla kanału w którym płynęło chłodziwo?
8. Na rys. 23 pokazano sposób doboru podobszarów celem przekazania informacji o mocy uzyskiwanej w obszarze paliwa do solwera przepływowego OpenFOAM. Na rys. 23 (2 od lewej) pokazane są 4 podobszary w płaszczyźnie radial-axial. W badanym przypadku mamy do czynienia z domeną cylindryczną. W jaki sposób należy intepretować „grubość” tych podobszarów w kierunku obwodowym. Ile komórek zostało przyjętych w kierunku obwodowym i czy testowano wpływ liczby tych komórek („grubości” tych podobszarów) na jakość uzyskiwanych wyników obliczeń?
9. Rysunki 29 i 30 pokazują rozkłady temperatury w kierunku osiowym uzyskiwane w obszarze paliwa i grafitu dla obliczeń uzyskanych z założeniem stałej mocy w obszarze paliwa (rys 29) i z zastosowaniem sprzężenia z solwerem Monte Carlo (rys. 30). W sensie średnim, różnice nie są duże. Z czego mogą wynikać niewielkie różnice w wynikach? Jak bardzo wzrosły koszty obliczeń w przypadku realizacji symulacji sprzężonych, w stosunku do wyjściowych symulacji OpenFOAM (stała wartość mocy) bez sprzężenia między solwerami?
10. Jak duże były koszty obliczeń numerycznych pełnych symulacji pracy rdzenia reaktora zaprezentowanymi w rozdziale 3 w porównaniu z kosztami pokazanymi w rozdziale 6 dla „uproszczonych” analiz solwer OpenFOAM + Serpent? W przypadku pełnych obliczeń prezentowanych w rozdz. 3 proszę wykazać koszty „przeliczone” dla typowego pojedynczego pręta paliwowego.
11. **Podsumowanie**

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że Pan mgr Michał Górkiewicz zrealizował cel pracy, którym było opracowanie techniki obliczeniowej, będącej połączeniem metod służących do analiz neutroniki i CFD. Doktorant zastosował tę technikę do analiz pracy pręta paliwowego, znajdującego się w rdzeniu wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem. Doktorant zrealizował również złożone analizy numeryczne pracy rdzenia reaktora, symulując proces usuwania prętów kontrolnych i dokonał analizy uzyskanych wyników obliczeń. Uzyskał bardzo interesujące wyniki badań. Jestem przekonany, że Autor rozprawy jest osobą w kompletną w zakresie stosowanych i rozwijanych przez niego metod numerycznych z zakresu neutroniki i wymiany ciepła. Opracowane przez Doktoranta metody będą miały duży wkład w rozwój metod służących do analiz procesów zachodzących w rdzeniu wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem.

Warto zwrócić uwagę, że wyniki badań uzyskane przez Doktoranta w trakcie realizacji pracy zostały opublikowane w czasopiśmie naukowym Energies.

Uważam, że przedłożona do recenzji praca doktorska Pana Michała Górkiewicza pt.: „**Development of localized coupled neutronic and CFD calculation for HTR application**” odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i **wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony**.