

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. 25 września 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Mateusza Nowaka

pt. „Reactivity control by the pumping system in the dual fluid reactor”

I. 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. 10 lipca 2023 r.

II. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Nowaka poświęcona jest opracowaniu i analizie uproszczonych, prototypowych układów reaktorów dwupłynowych (ang. dual fluid reactor), jednego w skali micro, drugiego w skali mini, a także zaprojektowania i analizy wirtualnych modeli pomp magneto hydrodynamicznych (MHD), które w przyszłości mogą być wykorzystane w instalacjach reaktorów dwupłynowych. Zaproponowana koncepcja pompy magneto hydrodynamicznej jest unikatowa, ponieważ dotyczy układu w którym występują dwie pętle obiegu ciekłego metalu, pierwsza po stronie tzw. układu paliwowego (ang. fuel) a druga po stronie chłodziwa (ang. coolant).

Motywacją do realizacji pracy było opracowanie koncepcji reaktora dwupłynowego, która w 2013 r. została opatentowana przez A. Huke, R. Goetz, A. Hussain, K. Czernski (promotor pracy) i S. Gottlieb.

Autor pracy Pan Mateusz Nowak zaprojektował i dokonał analizy prototypowych elementów reaktorów dwupłynowych. W szczególności, dokonał analizy wpływu prędkości przepływu na intensyfikację procesu wymiany ciepła, jaki ma miejsce w badanych, prototypowych, układach tzw. mikro- i mini-demonstratorów (ang. micro- and mini-demonstrator) w których czynnikiem roboczym jest ciekły metal. Warto podkreślić, że zastosowanie klasycznych pomp o napędzie mechanicznym do pracy w agresywnym i wysokotemperaturowym środowisku jaki ma miejsce w reaktorach dwupłynowych jest zadaniem trudnym. Autor rozprawy zaproponował więc zastosowanie pompy magneto hydrodynamicznej, która może znaleźć zastosowanie w ww. układach. Konstrukcja pompy magneto hydrodynamicznej wymagała opracowania nowych narzędzi obliczeniowych, które pozwoliłyby nie tylko na jej zaprojektowanie, ale również umożliwiłyby optymalizację pracy całego układu. W procesie optymalizacyjnym funkcją celu była minimalizacja natężenia prądu w obwodzie elektrycznym. Spełnienie funkcji celu uzyskano poprzez modyfikację

wymiarów geometrycznych pompy (kanałów). Zadania te były dużym wyzwaniem, a Kandydat zrealizował postawione cele badawcze.

Praca mgr Mateusza Nowaka wnosi istotny wkład w rozwój przyszłych koncepcji reaktorów dwupłynowych. Autorowi udało się opracować wirtualny model pompy magnetohydrodynamicznej dla układów, które wcześniej nie były rozważane. Pracę uważam za bardzo istotną dla energetyki jądrowej.

III. Struktura pracy i ocena wartości naukowej

W rozdziale 1 dokonano przeglądu różnych typów reaktorów jądrowych czwartej generacji. Dyskusja dotyczyła reaktora prędkiego chłodzonego sodem (ang. sodium-cooled fast reactor), reaktora prędkiego chłodzonego ołowiem (ang. lead-cooled fast reactor) i reaktora w którym chłodziwem jest ciekła sól (ang. molten salt reactor).

Sformułowano następującą tezę pracy:

„... reaktywność i wymiana ciepła w reaktorze dwupłynowym mogą być kontrolowane prędkością przepływu ciekłego metalu w rdzeniu reaktora .”

Oznacza to, że potencjalnie możliwe jest kontrolowanie procesów rozszczepienia i wymiany ciepła poprzez regulację prędkości ciekłego metalu w reaktorze dwupłynowym. Doktorant wykazał w rozdziale 5, że w przypadku zaproponowanych rozwiązań wymienników ciepła (prototypów w skali micro i mini) prędkość czynnika istotnie wpływa na intensyfikację procesu wymiany ciepła.

W dalszej części rozdziału 1 przedstawiono informację o oprogramowaniu, które zostało wykorzystane do analiz cieplno-przepływowych. Analizy te wykonano z pomocą programu Cathare-2. Oprogramowanie Cathare-2 służy do realizacji obliczeń związanych z szeroko rozumianym bezpieczeństwem reaktorów jądrowych. Ten wielomodułowy program umożliwia realizację obliczeń zarówno dla zagadnień zero-, jedno- jak i dwu-wymiarowych w zależności od stopnia skomplikowania elementów układu, jak i fizyki badanych procesów cieplno-przepływowych. W mojej ocenie, wybór ww. oprogramowania był w pełni uzasadniony. Zastosowanie do projektowania i optymalizacji pompy magnetohydrodynamicznej metod CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) byłoby trudne ze względu na duży koszt obliczeniowy związany z zastosowaniem tych technik.

W rozdziale 2 krótko przedstawiono zasadę działania reaktorów dwupłynowych. Omówione zostały mikroreaktory konstruowane w postaci rury cieplnej (ang. heat pipe). Przedstawione zostały również zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa pracy reaktorów dwupłynowych. Następnie, Kandydat umotywował swoje działania, których celem było opracowanie dwóch prototypów reaktorów dwupłynowych (wymenników ciepła) w skali micro- i mini.

W podrozdziale 2.3 przedstawione zostały równania różniczkowe służące do teoretycznego opisu procesów cieplno-przepływowych jakie rozpatrywane są w pracy. Kandydat stosuje szczególnie sposób zapisywania równań Naviera-Stokesa i równania energii (wzory 2.2 i 2.3). Symbol „ δ ” użyty został służy do opisu operatora pochodnej cząstkowej (zwykle jest używany symbol „ ∂ ”), natomiast wektor prędkości jest oznaczony jest jako wielkość skalarna v (zwykle stosuje się symbol \mathbf{v} – pogrubione lub \vec{v} -strzałka nad symbolem). Autor stwierdza, że „Równania Naviera-Stokesa i energii tworzą zbiór jednoczesnych równań różniczkowych cząstkowych opisujących ruch przenoszenia energii w płynie”. Powyższy układ należałoby uzupełnić równaniem zachowania masy.

Następnie zdefiniowano trzy liczby podobieństwa, które posłużyły do projektowania prototypowego wymiennika ciepła w skali „mini”, w oparciu o wyniki uzyskane dla

wymiennika w skali „micro”. Pierwsza związana była z samym przepływem i była to liczba Reynoldsa. Pozostałe dwie dotyczyły wymiany ciepła i były to liczby Nusselta i Prandtla. Wybór liczb podobieństwa ma istotne znaczenie na etapie projektowania, bo w ten sposób ustala się pewne cechy samopodobieństwa między dwoma różnymi (np. geometrycznie) układami. Wydaje się że wybór liczb Nusselta i Prandtla był w pełni uzasadniony w celu zachowania takich samych współczynników wymiany ciepła na ściankach obydwu badanych układów.

W podrozdziale 2.5 przedstawiono model matematyczny służący do opisu ruchu ciekłego metalu przewodzącego prąd elektryczny. Model ten posłużył w dalszym etapie prac do zdefiniowania uproszczonych równań służących do projektowania pompy magneto hydrodynamicznej. W celu uzyskania teoretycznego opisu oddziaływania siły magnetoelektrycznej na przepływ, równania Naviera-Stokesa i ciągłości uzupełniono równaniami Maxwella. Uzyskano układ równań, znany jako równania magneto hydrodynamiki (w skrócie MHD), w którym w równaniach zachowania pędu pojawiła się siła Lorentza. Doktorant zdefiniował układ równań MHD wzorami 2.9. Niestety ze względu na sposób ich wykorzystania w pracy, równania te zapisano dla wielkości „skalarnych”, co obniżyło ogólność tego sformułowania. Mam następujące uwagi do równań 2.8 i 2.9:

- pola wektorowe: **B** (magnetyczne), **E** (elektryczne) i **J** (gęstość prądu) w równaniach Maxwella w r. (2.8) i równaniach MHD (2.9) można było oznaczać pogrubioną czcionką lub stosując symbol strzałki (na górze tych symboli). Taki zapis stosuje się zwyczajowo dla opisu pól wektorowych.
- Nie widzę wyjaśnienia wielkości c w równaniu 2.8.
- Równania MHD we wzorach 2.9 należało zapisać dla wektora prędkości \mathbf{v} . Działanie siły przyspieszenia grawitacyjnego w r. 2.9 należało oznaczyć przy pomocy wektora \mathbf{g} . W obecnym zapisie zarówno v , jak i g są wielkościami skalarnymi.
- W równaniu ciągłości (pierwsze równanie w r. 2.9) i w ostatnim równaniu opisującym bezdywergentność pola magnetycznego **B**, należało zastosować operator dywergencji ($\text{div}()$ lub $\nabla \cdot$). Zastosowanie operatora „Nabla” skutkuje pojawieniem się wielkości wektorowych w tych równaniach, co nie jest prawdą.
- Nieliniowy składnik w równaniach zachowania pędu również nie jest poprawnie zapisany. W celu uzyskania wektora należało użyć symbolu „kropki” po pierwszym wektorze prędkości w tym wyrażeniu.
- Przypuszczam, że przy członach dyfuzyjnych w r. zachowania pędu (2.9) zamiast symbolu ρ'' powinna być lepkość dynamiczna płynu.
- Nie podano definicji współczynnika oporu elektrycznego ρ''
- Do opisu pochodnych cząstkowych w r. 2.8 i 2.9 użyto symbolu „ δ ”. Zazwyczaj tę operację oznacza się symbolem „ ∂ ”.

W podrozdziale 2.6 przedstawiono krótką charakterystykę zasady działania pomp magneto hydrodynamicznych.

W rozdziale 3 przedstawiono opis oprogramowania wykorzystywanego do modelowania procesów cieplno-przepływowych jak i opis równań służących do wyznaczenia strat wynikających z pracy pompy. Uwagi dotyczące zapisu układu równań ciągłości, pędu i energii we wzorze 3.1 są takie same jak powyżej (rozdział 2). Analizy cieplno-przepływowe wykonano z zastosowaniem programu Cathare-2. Oprogramowanie Cathare-2 zostało opracowane w CEA-Grenoble. Narzędzie to pozwala na uproszczoną analizę przepływów dwufazowych i przepływów z reakcjami wynikającymi z procesu rozszczepiania jąder atomowych.

Do modelowania pracy pompy magneto hydrodynamicznej wykorzystano uproszczoną metodę nazywaną „metodą zastępczego obwodu” (ang. Equivalent Circuit Method, ECM)

autorstwa Lee i Kima (2017). W r. 3.3 pokazano bilans strat dla przepływu cieczy lepkiej, przewodzącej prąd elektryczny, wywołanych oddziaływaniem pól magnetycznych i elektromagnetycznych oraz strat hydraulicznych. Jednostkę w równaniu (3.3) jest Pascal (Pa). Moim zdaniem wykładnik potęgi w wyrażeniu, H_d (wysokość kanału) w mianowniku w pierwszym członie na prawej stronie r. 3.3 (różnica ciśnień wywołana działaniem pola magnetycznego) i w r. 3.6 powinien wynosić 1, a nie 2. Jak rozumiem, metoda obwodu zastępczego (ECM) nie jest dostępna w oprogramowaniu Cathare-2, tak więc, Kandydat samodzielnie zaimplementował tę metodę do obliczeń. Metoda ECM zostanie później wykorzystana w procesie optymalizacji pracy pompy. Myślę, że zastosowanie metody obwodów zastępczych do analizy i optymalizacji pompy magneto hydrodynamicznej było dużym wyzwaniem i jest jednym z głównych osiągnięć pracy.

W rozdziale 4 podano ogólne informacje na temat algorytmów optymalizacyjnych jakie zastosowano w pracy. Przedstawiono tutaj dwa podejścia metodę „symulowanego wyżarzania” (ang. simulated annealing) oraz metodą „wieloczynnikowej regresji” (ang. multivariate regression). Na schemacie 4.1 przedstawiono przebieg procesu optymalizacji z wykorzystaniem ww. metod.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla prototypowych wymienników ciepła w skali micro i mini. Jak już wspomniano, obliczenia przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Cathare-2. Moim zdaniem schemat wymienników przedstawiony na rys. 5.2 nie jest wystarczająco szczegółowy. Brakuje tutaj informacji w jaki sposób modelowano poszczególne elementy układu, jaka była ilość rur w poszczególnych obiegach, czy może to była to jedna rura w każdym z obiegów?

Nie zdefiniowano współczynników podobieństwa ReA (szerokość rdzenia) i EuA (wysokość rdzenia) na stronie 55. Ich definicja jest kluczowa, bo zostały one użyte w procesie modelowania całego układu cieplno-przepływowego.

Kandydat stwierdza, że poprawność działania oprogramowania Cathare-2 została sprawdzona przed rozpoczęciem obliczeń. Nie znalazłem jednak w pracy wyników obliczeń wstępnych, wykonanych dla uproszczonego modelu układu, który pozwoliłyby stwierdzić poprawność zdefiniowania zadania obliczeniowego w programie. Cytowane są jedynie odniesienia do prac innych autorów. Sensowne byłoby przeprowadzenie własnego procesu walidacji.

W rozdziale 5.2 przedstawiono wyniki analiz cieplno-przepływowych dla ciekłego metalu z zastosowaniem programu Cathare-2. W tabeli 5.1 przedstawione są własności wody, jednak czynnik ten nie był w pracy analizowany. Definicja tego czynnika wydaje się więc zbędna. W podrozdziale 5.2.1 przedstawiono wyniki analiz, przyjmując liczby podobieństwa w postaci liczb Reynoldsa i Nusselta. Nie przedstawiono analizy z zastosowaniem liczby Prandtla, pomimo tego, że parametr ten był zdefiniowany w rozdziale 2.4. Z opisu przedstawionego w podrozdziale 5.2.1 nie wynika jasno, które parametry zostały utrzymane jako wielkości stałe podczas realizacji eksperymentu numerycznego i czy obliczenia wykonano z uwzględnieniem procesu wymiany ciepła pomiędzy chłodziwem, a drugim czynnikiem które nazywane jest „paliwem”. Pytanie to dotyczy przyjętych warunków brzegowych na ściankach rur (rury) – czy założono tutaj ścianki adiabatyczne (bez wymiany ciepła) ? W celu uzyskania podobieństwa przepływów (stała liczba Reynoldsa) Kandydat zdecydował się zmienić zarówno skalę prędkości jak i skalę długości (średnice rur, rury) w jednym z prototypowych układów (micro). W konsekwencji uzyskał układ typu micro w którym średnica rurek była większa od tej dla prototypu w skali mini. Nie jest dla mnie jasne czy przyjęcie takich, a nie innych, wymiarów średnic rurek jest możliwe, gdyż w praktyce istnieją pewne ograniczenia technologiczne które dany obiekt czy element musi spełnić. Z drugiej strony rozmiar elementów typu micro powinien być mniejszy od rozmiarów elementów typu mini-, podczas gdy w pracy jest na odwrót (Tabla na str. 57). Analizowane w pracy przepływy są przepływami w pełni

turbulentnymi (rys. 5.3, $Re > 10\ 000$). Rozumiem, że w oprogramowaniu Cathare-2 zastosowano pewne korelacje, które pozwalają opisać straty ciśnienia i uzyskać odpowiednie współczynniki wymiany ciepła na ściankach rur, typowe dla przepływów turbulentnych. Metodyka realizacji obliczeń w programie Cathare-2 nie została w pracy wyjaśniona. Brak ww. informacji powoduje, że obliczenie błędów względnych liczb Reynoldsa prezentowanych rys. 5.4, nie jest jasne. Błędy są niewielkie, na poziomie 1-2% (co świadczy o wiarygodności uzyskanych wyników), jednak nie jest znane źródło tych błędów. Czy są one spowodowane błędami zaokrągleń operacji arytmetycznych, czy też różnicami w opisie tych modeli? To samo pytanie dotyczy rys. 5.5, pokazującego błąd względny (rzędu 0,5-1%) w obliczeniach liczby Nusselta, pomiędzy obydwoma prototypowymi układami. Autor nie precyzuje źródła tych błędów. Wyniki przedstawiono na rysunkach 5.3 i 5.4, a także na późniejszym rysunku na stronie 59, rys. 5,5 itd. wyrażone są w funkcji „core cell”. Co oznacza ten termin? Różnice uzyskane w obliczeniach dla konwekcji wymuszonej pokazano na rys. 5.6 i 5.7. Tutaj różnice są większe (rzędu 10%). Na rys. 5.7 pokazano, że najlepszą zgodność uzyskano przy założeniu współczynnika $c = 0.9$. Dlaczego? Rysunek 5.8 przedstawia ewolucję współczynnika c w funkcji prędkości ciekłego metalu. Współczynnik ten przyjmuje wartość 0.9 dla dużych prędkości i uzyskuje mniejsze wartości: 0.5-0.65 dla małych wartości v . W pracy nie wyjaśniono przyczyny tych różnic? Warto podkreślić, że wybór liczby Nusselta był trafny i uzyskano tutaj dobre zgodności wyników obliczeń dla prototypowych układów typu micro i mini.

W podrozdziale 5.2.2 przedstawiono wyniki symulacji numerycznych z aktywnym procesem wymiany ciepła pomiędzy chłodziwem a paliwem. Przy aktywnym procesie wymiany ciepła temperatury cieczy na wlotach obydwu obiegów były utrzymywane na stałym poziomie, podczas gdy temperatury na wylocie były zmienne. Doktorant nie precyzuje czy przepływ był wymuszony poprzez układ pomp, czy prędkość przepływu była zadana przez użytkownika programu. Rysunek 5.11 ponownie pokazuje, że liczba Nusselta jest prawidłowo dobraną liczbą podobieństwa. Pozwala ona prawidłowo określić zmiany wybranych wielkości w badanych układach, gdyż w zakresie badanych prędkości przepływu ($v=0.1-2$ m/s) można zaobserwować stałą wartość współczynnika c (0.88).

W rozdziale 6 podsumowano najważniejsze osiągnięcia Autora rozprawy. Zaprezentowano tutaj projekt pompy magnetohydrodynamicznej który wykonany został z zastosowaniem „metody obwodu zastępczego”. W tym rozdziale przedstawiono również proces optymalizacji pracy wirtualnej pompy magnetohydrodynamicznej z zastosowaniem metody „wyżarzania symulacyjnego”. Obliczenia magnetohydrodynamiczne i optymalizację układu przeprowadzono dla czterech pomp. Charakterystyki dwóch z nich zaczerpnięto z danych literaturowych [Lee i Kim, 2017] oraz [Borges i in., 2010].

W podrozdziale 6.1 przedstawiono wyniki walidacji opracowanej w pracy „metody obwodu zastępczego” (ECM). Pierwszą symulację przeprowadzono dla danych Lee i Kima, w której czynnikiem roboczym był ciekły sód reagujący z dwutlenkiem węgla. Dobre zostały pewne wielkości tj. rezystancję i chropowatość stali nierdzewnej celem uzyskania wymaganych wartości natężenia prądu elektrycznego (119,27A). Drugą symulację wykonano dla danych uzyskanych z pracy Borges i in. Tutaj dobrano odpowiednie wartości rezystancji i grubości ścianki pompy, w celu uzyskania żądanych wartości natężenia prądu (802.13A). W obu przypadkach uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń, co świadczy o wiarygodności zastosowanej metody ECM. Następnie przeprowadzono obliczenia dla reaktorów dwupłynowych przy założeniu znacznie wyższych wartości natężenia prądu (rzędu i o dwa rzędy wielkości wyższych) od tych które były przyjęte poprzednio (9800A i 10100A). Po stronie paliwa przyjęto mieszaninę eutektyczną uranowo-chromową, natomiast jako chłodziwo przyjęto ciekły ołów. Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 6.1. Myślę, że przyjęte wartości

natężenia prądu elektrycznego można było również zaprezentować w tabeli 6.1, podobnie jak zostało to zrobione dla zoptymalizowanych przypadków w tabeli 6.2.

W rozdziale 6.2 przedstawiono wyniki optymalizacji wszystkich czterech pomp magneto hydrodynamicznych z zastosowaniem metody „symulowanego wyżarzania”. Funkcją celu była minimalizacja natężenia prądu w obwodzie elektrycznym. Optymalizację przeprowadzono przy założeniu stałej wartości przekroju kanału, pola indukcji magnetycznej, natężenia przepływu ciekłego metalu oraz ciśnienia całkowitego wzdłuż kanału. Uzyskane wyniki optymalizacji pokazują we wszystkich analizowanych przypadkach następuje zwiększone szerokości kanałów i zmniejszenie ich wysokości (tabela 6.2). Uzyskane wyniki są przekonujące. Interesujące są wyniki zaprezentowane na rys. 6.3. Wyraźnie pokazują one zależność natężenia prądu od długości kanału. Wyniki zawarte w rozdziale 6.2 są bardzo wartościowe. W dalszej części pracy przeprowadzono kolejne optymalizacje minimalizujące natężenie prądu wykorzystując aproksymację wielomianową i metodę wieloczynnikowej regresji. Tabela 6.8 podsumowuje wyniki wszystkich optymalizacji. W przypadku zastosowania aproksymacji wielowymiarowej i metody wieloczynnikowej regresji uzyskano raczej niewielkie zmiany funkcji celu w stosunku do wyników uzyskanych przy pomocy metody „symulowanego wyżarzania”. Moim zdaniem wyniki uzyskane przy pomocy ostatnich dwóch metod nie mają praktycznego znaczenia i można było je zaniedbać.

W rozdziale 7 zaprezentowano podsumowanie i wnioski.

IV. Szczegółowe pytania do Autora rozprawy

W mojej recenzji pojawiło się szereg pytań do Autora pracy:

1. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób prędkość ciekłego metalu wpływa na reaktywność badanego reaktora dwupłynowego (teza pracy)?
2. Proszę wyjaśnić znaczenie fizyczne wielkości c w r. 2.8.
3. Proszę omówić współczynniki podobieństwa ReA (szerokość rurki rdzeniowej) i EuA (wysokość rurki rdzeniowej) wspomniane na stronie 55. W jaki sposób współczynniki te zostały włączone do obliczeń przy użyciu oprogramowania Cathare-2 (brak wzorów)?
4. Rysunek 5.2 przedstawia schemat prototypowych układów typu micro i mini, zdefiniowanych w oprogramowaniu Cathare-2. Proszę o omówienie elementów pokazanych na tym rysunku. Nie jest dla mnie jasne, w jakim stopniu uproszczono wybrane elementy układu, takie jak rury, kanały, wymienniki ciepła (o ile się tam znalazły). Zakładam, że straty ciśnienia w rurach obliczane były na podstawie korelacji (w pełni rozwinięty przepływ turbulentny). Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób program Cathare-2 symuluje te elementy układu które charakteryzują się dużym stopniem skomplikowania geometrycznego?
5. W podrozdziale 5.2.1 pokazano wyniki analiz numerycznych przyjmując pewne liczby podobieństwa tj. liczbę Reynoldsa czy liczbę Nusselta. Dobór powyższych parametrów jest oczywisty, gdyż na tym etapie nie uwzględniono w analizie wymuszenia przepływu ciekłego metalu np. przy pomocy pompy magneto hydrodynamicznej. Proszę o wskazanie jaka liczba bezwymiarowa mogłaby być zastosowana jeśli hipotetycznie rozważany byłby projekt reaktora dwupłynowego z aktywną pompą magneto hydrodynamiczną? Możliwym kandydatem mogłaby być tak zwana magnetyczna liczba Reynoldsa, $Re_m = UL/v_m$, gdzie wyraz w mianowniku opisuje opór elektryczny. Proszę o podanie przykładu/przykładów takich liczb i dokonanie wstępnej oceny ich przydatności w badaniu bardziej złożonych układów.
6. Proszę o wyjaśnienie znaczenia ilorazu temperatur, oznaczonych symbolem c , w równaniach 5.6 i 5.7. Co oznaczają temperatury T^μ i T^m ? Czy są to pewne średnie

temperatury czy lokalne temperatury na wlocie do rury/rur? Rysunek 5.8 przedstawia zmianę współczynnika c w funkcji prędkości czynnika. Współczynnik ten przyjmuje wartości na poziomie 0.9 dla dużych prędkości czynnika i dochodzi do 0.5-0.65 dla małych wartości v . Proszę o wyjaśnienie tego procesu.

7. Rozumiem, że „metoda obwodu zastępczego” została zaimplementowana przez Autora. Proszę o informację jak duży był wkład pracy Kandydata w opracowanie tej metody i ew. włączenia jej do pętli optymalizacyjnej?
8. Optymalizacja geometrii pompy magnetohydrodynamicznej przedstawiona w podrozdziale 6.2, miała na celu zmniejszenie natężenia prądu (funkcja celu). Wybór funkcji celu jest jasny i uzasadniony. We wszystkich przypadkach optymalizacja spowodowała zwiększenie szerokości kanału W_d i zmniejszenie jego wysokości H_d . Proszę o wyjaśnienie dlaczego algorytm optymalizacyjny wybrał większą szerokość kanału i mniejszą jego wysokość? Czy wynik ten zależał w jakimś stopniu od założeń upraszczających przyjętych w pracy ?
9. Proszę o informację, czy optymalizacje pompy magnetohydrodynamicznej wykonane z pomocą metody „symulowanego wyżarzania” wykorzystywały w swojej pętli pewne korelacje empiryczne uwzględniające straty ciśnienia. Chodzi mi o korelację uwzględniającą przykładowo zmianę topologii kanału (stosunku szerokości kanału do wysokości). W rzeczywistości na bocznych powierzchniach pompy tworzą się warstwy przyścienne, które mogą powodować dodatkowe straty ciśnienia (płyn lepki i turbulentny). Czy ten efekt został uwzględniony w równaniu 3,3 przez współczynnik oporu przepływu, lub podobny, czy nie było to możliwe ?
10. W większości zagadnień inżynierskich proces optymalizacji związany jest z nałożonymi „więzami” w postaci ograniczeń geometrycznych. Przykładowo wymiary niektórych elementów nie mogą być mniejsze lub większe od pewnych wartości dopuszczalnych ze względów technologicznych. Jak rozumiem, wyniki optymalizacji przedstawione w pracy przeprowadzono bez narzucania ograniczeń geometrycznych na szerokość czy wysokość kanału. Na przykład wysokość H_d dla pompy Borgesa i in. po optymalizacji została zmniejszona o jeden rząd wielkości w stosunku do jej wyjściowego rozmiaru. Czy wysokość 1.3mm jest fizycznie akceptowalna? Czy w przyszłości możliwe jest nałożenie pewnych ograniczeń geometrycznych w opracowanym algorytmie optymalizacyjnym?

V. Podsumowanie

W mojej ocenie Pan Mateusz Nowak w pełni zrealizował założone cele badawcze. Cele te można podsumować następująco: zaprojektowanie i analiza wirtualnych modeli prototypowych elementów reaktorów dwuprzepływowych w skali micro i mini oraz badanie wpływu prędkości ciekłego metalu na charakterystykę wymiany ciepła w tych układach, projektowanie i analiza wirtualnych modeli pomp magnetohydrodynamicznych oraz optymalizacja pracy pomp metodą „symulowanego wyżarzania” oraz innymi metodami optymalizacyjnymi.

Pierwszym istotnym osiągnięciem tej pracy jest zaprojektowanie wirtualnego modelu pompy magnetohydrodynamicznej (MHD), zdolnej do pracy w wysokotemperaturowym i agresywnym środowisku reaktora dwupłynowego. Zaprojektowanie wirtualnego modelu pompy hydrodynamicznej było zadaniem trudnym i wymagało od Kandydata dużego nakładu pracy, w tym opracowania specjalistycznych narzędzi obliczeniowych, wykorzystujących metodę obwodu zastępczego. Narzędzie to musiało być wydajne obliczeniowo, co nie było zadaniem łatwym, ze względu na duży stopień skomplikowania badanego procesu.

Drugim ważnym osiągnięciem była optymalizacja pracy pomp magnetohydrodynamicznych dla reaktorów dwupłynowych w celu minimalizacji natężenia prądu w obwodzie elektrycznym.

Autor rozprawy w pełni sprostął trudnym zadaniom, związanym z projektowaniem i analizą złożonych prototypowych elementów reaktorów jądrowych czwartej generacji. Tego typu analizy nie są powszechnie znane w literaturze i wyniki uzyskane przez Autora rozprawy stanowią duże osiągnięcie naukowe i techniczne.

Praca zrealizowana przez Pana Mateusza Nowaka ma bardzo duże znaczenie dla rozwoju energetyki jądrowej. Uzyskane wyniki są nowatorskie i w znacznym stopniu przyczynią się do rozwoju reaktorów dwupłynowych. Pragnę podkreślić, że uwagi krytyczne zawarte w mojej recenzji nie umniejszają wagi osiągnięcia Doktoranta.

Uważam, że przedłożona do recenzji praca doktorska Pana Mateusza Nowaka pt.: **„Reactivity control by the pumping system in the dual fluid reactor”** w pełni odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i **wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**