

Prof. dr hab. Konrad Czerski  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Szczeciński  
Ul. Wielkopolska 15  
70-451 Szczecin

konrad.czerski@usz.edu.pl

Szczecin, dnia 31.01.2020r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Spirzewskiego**

zatytułowanej:

*„New Best-Estimate Model for Dryout Prediction at BWR Operating Conditions”*

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych rodzajów reaktorów jądrowych na świecie jest reaktor wodny wrzący (BWR), który wykazuje szereg zalet użytkowych w stosunku do swojego głównego konkurenta jakim jest reaktor wodny ciśnieniowy (PWR). Uproszczenie konstrukcji reaktora, polegające na doprowadzeniu do wrzenia wody i wytworzenia pary wodnej w rdzeniu reaktora, skutkuje jednak w bardziej złożonej interakcji termicznej prętów paliwowych z otaczającą ją wrzącą wodą. Stąd też poznanie tego oddziaływania i jego modelowanie stanowi jedno z najbardziej istotnych elementów decydujących o bezpiecznej eksploatacji reaktora. Przykładem takiej pracy jest dysertacja pana mgr Michała Spirzewskiego, której głównym celem jest analiza zjawiska wysychania ścianek prętów paliwowych, co znacznie ogranicza przekaz ich ciepła do chłodziwa i tym samym może prowadzić do gwałtownego wzrostu temperatury prętów.

Zjawisko wysychania i jego wpływ na przekaz ciepła jest znany i był intensywnie badany dla reaktorów wodnych wrzących od wielu dekad. Prowadzi ono m. in. do ograniczenia gęstości energii produkowanej w prętach paliwowych i określenia tzw. krytycznego strumienia ciepła (ang. Critical Heat Flux – CHF). Pomimo wielu badań eksperymentalnych i analiz numerycznych wykonanych w przeszłości, modele fizyczne zachodzących zjawisk są ciągle niewystarczająco poznane, co skutkuje w stosunkowo dużych niepewnościach przewidywanych parametrów pracy reaktora. Dlatego też próba jednoczesnego wykorzystania najnowszych metod numerycznych i bardzo bogatego materiału doświadczalnego zebranego dla różnych układów eksperymentalnych, używając przy tym jednolicie zdefiniowanych

narzędzi matematycznych jest na pewno przedsięwzięciem bardzo istotnym i daje w perspektywie możliwość polepszenia konstrukcji reaktorów BWR. Dokładniejsza znajomość takiego parametru jak CHF pozwoli zarówno na zwiększenie efektywności produkcji energii jak również na zwiększenie całkowitej mocy reaktora przy zachowaniu jego ściśle określonego marginesu bezpieczeństwa.

Bezpośrednim celem dysertacji było przeprowadzenie zaawansowanych obliczeń numerycznych, opierających się na fizycznych modelach przepływu dwufazowej cieczy i wymiany ciepłej z otoczeniem przy wykorzystaniu wyników szeregu wcześniej wykonanych eksperymentów w warunkach diabatyicznego i adiabatyicznego przepływu w pionowych rurach. Do obliczeń wykorzystano najnowszą wersję kodu systemowego CATHARE-3, gdzie wprowadzono nowy fenomenologiczny model odrywania i osadzania kropelek wody przy uwzględnieniu ich udziału masowego w badanym przepływie. Następnym celem było przeprowadzenie pogłębionej analizy niepewności eksperymentalnych i modelowych, które są kluczowe dla określenia marginesów bezpieczeństwa w reaktorach jądrowych. Tutaj wykorzystano specjalnie rozwinięty dla tych potrzeb jednowymiarowy kod systemowy DARIA.

Dysertacja jest napisana w sposób bardzo przejrzysty i podzielona na cztery główne części: wprowadzenie, narzędzia i metody, wyniki i podsumowanie, które obejmują 13 szczegółowych rozdziałów i są uzupełnione o wyczerpujący spis referencji.

W pierwszej części autor przedstawił motywację pracy i jej umiejscowienie w szerszej optyce badań nad reaktorami jądrowymi. W drugim rozdziale tej części autor skupił się na opisie podstawowych zjawisk fizycznych związanych z przepływem dwufazowym i podał szereg numerycznych związków pozwalających na ilościową parametryzację obserwowanych korelacji między wielkościami fizycznymi.

W drugiej części pracy opisane zostały modele fizyczne zastosowane do badania przepływu pierścieniowego w pionowych rurach oraz modelowania spadku ciśnienia i prędkości przepływu. Szczególną uwagę autor zwrócił na ilościowy opis zjawiska odrywania się i osadzania kropelek wody oraz na precyzyjną parametryzację jednego z najważniejszych parametrów jakim jest początkowa frakcja oderwania (ang. initial entrained fraction – IEF), koniecznym do prawidłowego przewidzenia efektu wyschnięcia powierzchni grzewczych. Autor zaproponował własne parametryzacje tej wielkości i wykorzystał je do modelowania krytycznego strumienia ciepła. W dalszych rozdziałach tej części autor przechodzi do szczegółowego opisu użytych kodów komputerowych i problemów związanych z analizą niepewności i czułości zastosowanego modelu oraz odpowiednich numerycznych rachunków. Ze względu na możliwość stosunkowo łatwego wyznaczenia rozkładu niepewności dla poszczególnych parametrów autor zastosował metodę Sobola oszacowania czułości zastosowanego modelu na zmianę poszczególnych parametrów.

Część trzecia rozprawy doktorskiej jest poświęcona opisowi otrzymanych wyników obliczeń numerycznych, które dają się połączyć w trzy zasadnicze grupy. Pierwsza z nich to porównanie hydrodynamicznych obliczeń modelowych z wynikami eksperymentalnymi stosując dwa różne modele frakcji oderwania: model Hewitta-Govana i model Okawy. W obu przypadkach zaproponowana parametryzacja początkowej frakcji oderwania (IEF) zaowocowała znacznie lepszym opisem danych eksperymentalnych. Następna grupa danych numerycznych otrzymanych w przedłożonej dysertacji koncentruje się na przewidywaniach efektu wyschnięcia powierzchni grzewczych (prętów paliwowych) prowadzącego do ograniczenia mocy reaktorów wodnych wrzących. Porównanie z wynikami eksperymentalnymi otrzymanymi w przeszłości przy różnych ciśnieniach wykazało, że wprowadzenie zaproponowanej zależności funkcyjnej parametru IEF od prędkości przepływu pozwala na zredukowanie błędów modelowych i tym samym lepszy opis zjawisk fizycznych. Powyższe wyniki umożliwiły dokonanie całościowej analizy niepewności i czułości modelowych przeprowadzonych rachunków w celu wyznaczenia krytycznego strumienia ciepła (CHF). Wykorzystano tutaj metodę Sobola, bazującą na wyznaczeniu odchyłeń standardowych poszczególnych parametrów fizycznych. Przeprowadzona analiza pozwoliła na wykazanie nie tylko jakościowe ale i ilościowe znaczenia lepszej parametryzacji IEF i jego wpływu na wartość CHF.

W czwartej i ostatniej części dysertacji autor podsumował krótko otrzymane rezultaty i przedstawił drogi dla dalszego rozwoju badanej tematyki, a w szczególności możliwości rozwoju kodu komputerowego DARIA. Ponadto w rozdziale 11 zwrócił on uwagę na pewne możliwości odmiennego opisu danych eksperymentalnych i numerycznych, które mogłyby dostarczyć więcej informacji koniecznych dla przeprowadzonej analizy niepewności modelowych. Poza tym wskazano na pewny deficyt w modelu przepływu tzw. Drift-Flux Model zastosowanym w kodzie DARIA w stosunku do bardziej zaawansowanego opisu tzw. Two-Fluid Model wykorzystanego w kodzie CATHARE-3, co uniemożliwiło przeprowadzenie analizy czułości i niepewności dla modelu Okawy frakcji oderwania.

Podsumowując, dysertacja przedłożona przez mgr Michała Spirzewskiego jest napisana bardzo starannie, a jej przejrzysta struktura pomaga czytelnikowi we swobodnym poruszaniu się wśród bogatej tematyki zarówno eksperymentalnej i teoretycznej. Na wyróżnienie zasługuje szeroki opis fizyczny i numeryczny dwufazowego przepływu płynów, który potem został wykorzystany w konkretnych rachunkach poczynając od przepływu pierścieniowego w rurach a kończąc na obliczeniach systemowych i wyznaczeniu krytycznego strumienia ciepła. Ponadto bogata ilustracja otrzymanych wyników w formie tabel i diagramów stanowi także o wysokiej jakości przedstawionej pracy. Z drugiej strony pewnym niedogodnieniem jest brak spisu użytych oznaczeń wielkości fizycznych i innych parametrów oraz ich skrótów, co z pewnością utrudnia lekturę dysertacji. Tutaj należy także wspomnieć, że w wielu wypadkach autor nie definiuje użytych oznaczeń użytych w równaniach, tak jak to ma miejsce np. dla

równań 2.4-2.9, czy też 3.1-3.4, a także używa wielkości, które nie były wcześniej zdefiniowane, jak np. „flow quality”. Poza tym z punktu widzenia recenzenta rozprawy doktorskiej przydatne byłoby także osobne zestawienie prac naukowych opublikowanych przez autora i jego udziału w konferencjach naukowych.

Merytorycznie praca doktorska pana Spirzewskiego reprezentuje wysoki poziom. Jej atutem jest porównanie obliczeń numerycznych z bardzo bogatą bazą danych doświadczalnych i zaprezentowanie zarówno ich ograniczeń jak również możliwości przewidywania konkretnych wielkości makroskopowych. Dokonano tego na przykładzie wyznaczenia wartości krytycznego strumienia ciepła dla reaktorów wodnych wrzących, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu bezpieczeństwa konstrukcji i decyduje o mocy cieplnej reaktora. Zastosowanie tutaj zaproponowanej przez autora (Nucl. Eng. & Design 2018) nowej parametryzacji początkowej frakcji oderwania dało bardzo dobre rezultaty jeśli chodzi o redukcję niepewności modelowania reaktorów i stanowi znaczące osiągnięcie, także dla zrozumienia fizyki leżącej u podstaw modeli numerycznych. Tematyka ta nie została jednak w pracy dalej rozwinięta. Ważnym osiągnięciem autora jest implantacja kodu systemowego DARIA, co umożliwiło elastyczne dostosowanie obliczeń numerycznych do stawianych zagadnień. Kierunki dalszego rozwoju badań i problemy związane z tą tematyką autor przedstawił samokrytycznie we wspomnianym wyżej rozdziale 11. Z drugiej strony pewny niedosyt pozostawia wykonana globalna analiza niepewności i czułości zastosowanych modeli, w szczególności w odniesieniu do parametru IEF. Zastosowano tutaj najprostszą wersję metody Sobola, ograniczając się do obliczenia odchyłeń standardowych poszczególnych parametrów, nie uwzględniając możliwości ich wzajemnej korelacji, co wymagałoby obliczenia macierzy kowariancji lub uwzględnienia drugiego rzędu w modelu Sobola. Ponadto brakuje także statystycznej analizy niepewności obliczonych odchyłeń standardowych, które decydują o tym, czy uzyskana redukcja niepewności w wyznaczeniu parametru IEF jest statystycznie znacząca. Jest to jednak tylko uwaga formalna, gdyż nawet pobieżna analiza wskazuje, że przy wykorzystaniu 3000 punktów eksperymentalnych otrzymana poprawa niepewności dla niektórych parametrów o 30% jest na pewno istotna.

Powyższe uwagi stanowią jedynie przyczynek do dyskusji otrzymanych wyników i potwierdzają moją bardzo dobrą opinię o przedłożonej dysertacji. Uważam, że spełnia ona w pełni wymogi ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pana mgr Michała Spirzewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

