

Kraków, 29 sierpnia 2019

Dr hab. Ludwik Pieńkowski, profesor AGH

Katedra Energetyki Jądrowej

Wydział Energetyki i Paliw

Akademia Górniczo - Hutnicza imienia Stanisława Staszica w Krakowie

30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30

e-mail ludwik.pienkowski@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Michała Spirzewskiego p.t.: "New Best-Estimate model for dryout prediction at BWR operating conditions"

W energetyce jądrowej jednym z wyzwań inżynierskich jest zapewnienie dobrego chłodzenia rdzenia reaktora. Rozszczepienie jądra, jego podział na dwa mniejsze, na dwa fragmenty rozszczepienia wyzwala energię, gdyż fragmenty te odpychają się elektrostatycznie. Wytracają jednak swoją energię kinetyczną hamując w materii na bardzo krótkim dystansie. W typowych lekkowodnych reaktorach energetycznych, w tym w reaktorach wrzących (BWR) fragmenty rozszczepienia zatrzymują się wewnątrz prętów paliwowych, rozgrzewają je, co oznacza, że pręty te wymagają dobrego chłodzenia przez przepływającą wodę.

Dla projektowania, budowy i eksploatacji reaktorów lekkowodnych, szczególnie reaktorów BWR kluczowe znaczenie ma dobre zrozumienie zjawiska dwufazowego, pierścieniowego przepływu (annular flow) wody oraz warunków wystąpienia niepożądanego zjawiska wyschnięcia ścianki (dryout). Zagadnienia te badane są od kilkadziesiąt lat, ale w ostatnich latach dokonano znacznego postępu w ich modelowaniu. Między innymi jest to wynik pracy zespołu profesora Henryka Anglerta, współpromotora recenzowanej rozprawy¹.

Dwufazowy przepływ pierścieniowy charakteryzuje się obecnością ciekłej wody w postaci błony przylegającej do ścianek i kropelek unoszonych przez parę wodną w centralnym *kominie*. Im większy jest strumień pary wodnej z kropelkami tym możliwy jest większy przekaz ciepła od ścianki do chłodziwa. Jednak, gdy przepływ ciepła przez ciekłą błonę jest zbyt intensywny albo, gdy strumień pary i kropelek w *kominie* jest zbyt gwałtowny, to dochodzi do zerwania cienkiej warstwy wody, czego konsekwencją jest gwałtowny wzrost temperatury ścianki, co może prowadzić do uszkodzenia rdzenia reaktora BWR. Zjawisko to nazywane jest osuszeniem ścianki, ale w polskiej literaturze anglojęzyczny termin dryout też jest używany. Naszkicowany mechanizm pokazuje, że wiarygodne modelowanie wartości maksymalnego strumienia ciepła (Critical Heat Flux, CHF) i warunków wystąpienia wyschnięcia ścianki są kluczowymi zagadnieniami dla reaktorów wrzących.

¹ patrz np. „BWR Hub Boiling Water Reactor Research Network”, <https://www.bwrhub.ac.uk/en/>, <https://www.bwrhub.ac.uk/wp-content/uploads/2018/02/Hitachi-Feasibility-Study-BWR-Hub-2018-02-12.pdf>
Henryk Anglert, Progress in understanding and modelling of annular two-phase flows with heat transfer, Nuclear Engineering and Design, Volume 345, 15 April 2019, Pages 166-182

Recenzowana rozprawa w bardzo czytelny i wyczerpujący sposób przedstawia zarysowane powyżej uwarunkowania wstępne, od motywacji poprzez opis pojęć, zagadnień ważnych dla reaktorów wrzących, w tym związanych z ich bezpieczeństwem. W tej części wyjaśniony jest również termin użyty w tytule rozprawy „Best-Estimate model”, który należy rozumieć, jako model dający realistyczne przewidywania, inaczej mówiąc przewidywania odzwierciedlające pracę rzeczywistego układu bez nakładania marginesów bezpieczeństwa. Jednocześnie w pracy podkreślono, że analizy bezpieczeństwa wymagają założeń konserwatywnych, czyli przewidywań pesymistycznych. W drugiej części rozprawy termin „Best Estimate Codes” wyjaśniony jest w odmienny sposób, ma odnosić się do kodów wykorzystujących odpowiednie uśrednienia, co umożliwia wykonanie obliczeń dla procesów zachodzących w gwałtowny sposób. Wydaje się, że spojrzenie na termin „best estimate” z obu stron jest ważne.

Część druga rozprawy rozpoczyna się od wyczerpującego opisu zjawiska przepływu pierścieniowego. Zostaje przedyskutowana zależność dobrego modelowania przepływu pierścieniowego od dobrej znajomości parametrów początkowych, czyli w chwili, gdy zaczyna się przepływ pierścieniowy. Autor rozprawy stawia hipotezę, że dobre modelowanie wymaga wiedzy o tym, jaka część wody w stanie ciekłym jest w postaci kropelek, gdy przepływ pierścieniowy rozpoczyna się. W literaturze anglojęzycznej wielkość ta nazywana jest Initial Entrained Fraction, IEF. Okazuje się, że wartość parametru IEF jest słabo wykorzystywana w kodach obliczeniowych, a kod systemowy CATHARE-3 zakłada, że wartość parametru IEF ustala użytkownik kodu.

Badanie zjawiska osuszenia ścianki było zasadniczym, tytułowym elementem rozprawy doktorskiej. Błąd przewidywania osuszania jest definiowany, jako różnica między obliczoną i zmierzoną mocą krytyczną, mocą osiąganą tuż przed krytycznym momentem osuszeniem ścianki. W pracy w szczególności badano wpływ parametru IEF na obliczaną moc krytyczną poszukując takiej parametryzacji IEF, która daje najmniejszy błąd. Po pierwsze pokazano, że w pewnych obszarach błąd prognozowania dryoutu bardzo słabo zależy od wartości parametru IEF. Za jedno z głównych osiągnięć doktoranta należy uznać zidentyfikowanie obszaru gdzie błąd prognozowania dryoutu zależy od IEF, zaproponowanie i zwalidowanie parametryzacji wielkości IEF podanej jako wzór nr 3.8 na stronie 49 (powtórzonej jako wzór 8.7 na stronie 110). Postawiono hipotezę, że IEF zależy jedynie od wartości bezwymiarowej pozornej prędkości przepływu (dimensionless superficial velocity) fazy gazowej i ciekłej. Nieco później, bo na stronie 110 przedstawiono heurystyczne, ale przekonujące uzasadnienie tej hipotezy.

Postawiona hipoteza naukowa modelowania wartości IEF była przez doktoranta badana na dwa sposoby. Po pierwsze porównano wyniki kodu systemowego CATHARE-3 uzyskane dla różnych wartości parametru IEF z danymi doświadczalnymi poszukując takiej wartości parametru IEF, przy której dostaje się najlepszą zgodność z wybranymi danymi doświadczalnymi. Po drugie, hipoteza ta, została zaaplikowana do rozbudowanego przez doktoranta uproszczonego kodu in-house o nazwie DARIA, a wyniki obliczeń zostały porównane z wynikami obliczeń kodu CATHARE-3.

Oryginalny kod CATHARE-3 oblicza zmiany proporcji ciekłej wody w kropelkach i w cienkiej błonie przylegającej do ściany wykorzystując model Hewitt-Govan opisujący proces *osadzania* i *porywania* kropelek wody. Wykonano obliczenia dla różnych wartości parametru IEF, porównano je z wynikami doświadczalnymi, co umożliwiło wyznaczenie

wolnych parametrów w równaniu 3.8, czyli znalezienia jawnej postaci funkcji modelującej wartość parametru IEF.

Dla zaimplementowanego do kodu CATHARE-3 modelu Okawa'y również przeprowadzono analizę jak poprzednio dla modelu Hewitt-Govan. Okazało się, że oba modele prowadzą do bardzo zbliżonych wielkości parametrów w równaniu 3.8 modelujących zmienność IEF, co pokazano w tabeli 3.8 na stronie 49 (są również w kopii tej tabeli na str.110) i na rysunku 8.10 na stronie 111. Natomiast na rysunkach 8.11 i 8.12 i w tabeli 8.8 pokazano, że wprowadzenie postulowanej hipotezy modelującej wielkość IEF daje wyniki bardziej zbliżone do wyników doświadczalnych. Jest to mocny argument wskazujący na wartość postawionej przez doktoranta hipotezy naukowej.

Należy dodać, że już w części walidacyjnej porównano wyniki obliczeń z wynikami eksperymentów adiabatycznych. Badania te pokazały, że zaimplementowany do kodu CATHARE-3 model Okawa'y daje lepsze przewidywania udziału *porywanych* kropelek w całkowitym przepływie.

Opisany powyżej wyniki już opublikowano w 2018 roku w czasopiśmie Nuclear Energy and Design, w artykule, którego pierwszym autorem jest doktorant (patrz referencja 51 w recenzowanej rozprawie). Co więcej wyniki te zostały już zauważone i docenione w niedawno opublikowanej pracy w Nuclear Energy and Design autorstwa SP Walker'a, A Dasgupta².

W trzeciej części recenzowanej rozprawy przedstawiono wyniki pracy, w tym te najważniejsze, przytoczone powyżej. Na początku tej części pokazano niedoskonałości modelu Hewitt-Govan, co dało motywację do zaimplementowania w kodzie CATHARE-3 modelu Okawa'y. Następnie przedstawiono szereg wyników cząstkowych prowadzących do wyników głównych. Sporo uwagi w tej części pracy poświęcono statystycznej analizie dokładności i czułości z wykorzystaniem kodu DARIA. Walidacja in-house kodu DARIA polegała na porównaniu jego wyników z wynikami kodu CATHARE-3 (rys.6.1, strona 74) i danymi doświadczalnymi (rys. 6.2, strona 74). Uproszczony własny kod DARIA wykorzystano również do przeprowadzenia analiz przepływu pierścieniowego dla geometrii wiązki prętów paliwowych, czyli sytuacji znacznie bliższej do tej występującej w reaktorach jądrowych. Następnie za pomocą kodu BIGUSA wykonano statystyczne analizy dokładności i czułości metodą wskaźników Sobola. Wyniki analiz zebrano w tabeli 9.1. Wydaje się jednak, że konkluzje z tej części pracy, której poświęcono wiele wysiłku mają charakter wstępny. W ostatnim zdaniu konkluzji autor stwierdza, że potrzebna są dalsze badania.

Rozprawę kończy podsumowanie gdzie wymieniono zrealizowane cele takie jak:

1. Zaimplementowanie modelu Okawa'y do kodu CATHARE-3. Wykonanie obliczeń walidujących dla modelu Hewitt-Govan i wprowadzonego modelu Okawa'y
2. Postawienie hipotezy naukowej o wpływie IEF na obliczaną moc krytyczną i jej walidacja
3. Rozwinięcie kodu in-house DARIA
4. Wykonanie globalnej analizy niepewności i wrażliwości.

² SP Walker, A Dasgupta, Phenomenological modelling of film-dryout 'critical heat flux', Nuclear Engineering and Design 354 (2019) 110178

Osiągnięcia merytoryczne sprawiają, że w mojej opinii praca zasługuje na wyróżnienie. Warto też podkreślić, że rozprawa napisana jest bardzo czytelnym językiem, co sprawia, że lektura bardzo trudnych zagadnień daje czytelnikowi dużo satysfakcji.

Z drugiej jednak strony recenzowana rozprawa stawia przed czytelnikiem zbędne wyzwania:

1. Rozprawie składa się z dwóch głównych, ale słabo powiązanych ze sobą wątków merytorycznych. Każdy z nich pojawia się w kilku miejscach i każdy rwie się pomiędzy kolejnymi miejscami. Utrudnia to zrozumienie treści pracy, gdyż między innymi zachodzą powtórzenia treści, co wprowadza niepotrzebne zamieszanie. Co więcej skutkiem takiego układu jest utrata ostrości w przedstawieniu najważniejszego wątku, czyli tego z głównej publikacji doktoranta (ref. 51 w rozprawie). Wydaje się, że bardziej zrozumiały byłby układ, w którym dwa główne wątki opisane byłyby w sposób ciągły, jeden po drugim:
 - a. Badanie hipotezy naukowej o wpływie IEF na krytyczny przepływ ciepła
 - b. Rozbudowa kodu DARIA od założeń, przez walidację, uwzględnienia geometrii wiązki prętów i na koniec wykonanie analizy statystycznej wyników z wykorzystaniem kodu BIGUSA

Pierwszy wątek opublikowano w 2018 roku (ref. 51 w rozprawie), a publikacja drugiego, którego doktorant też jest pierwszym autorem właśnie się ukazała³.

2. W pracy bardzo licznie przytaczane są skomplikowane wzory, ale brakuje spisu wykorzystywanych oznaczeń i spisu definicji najważniejszych pojęć. Na szczęście spis oznaczeń jest podany w dwóch głównych publikacjach doktoranta, co ułatwia lekturę rozprawy. Dlaczego zabrakło podobnego spisu w rozprawie doktorskiej?
3. Brakuje spisu rysunków i tabel
4. Podpisy pod wieloma rysunkami i tabelami są nieczytelne. Na przykład w opisach rysunków 8.1 – 8.6 podane jest tylko, że pokazują one błąd względny, ale brakuje istotnej informacji, czyli wskazania wielkości fizycznej, której błąd względny jest prezentowany.

Pytania i prośby:

1. W rozdziale 6.3 przedstawiony jest opis rozbudowanego in-house kodu DARIA. Trudno jednak na tej podstawie wyobrazić sobie jak ten kod działa, ani jak działał przed rozbudową. Bardzo bym prosił o przedstawienie blokowego schematu programu DARIA przed i po rozbudowie.
2. Jakie było kryterium do wybrania 173 zestawów danych eksperymentalnych celem wykonania nowej parametryzacji IEF (patrz strona 109⁴)? Wydaje się, że progi selekcji były dość miękkie. Jakie byłyby wyniki dalszej analizy gdyby zaakceptowano nie 173, a powiedzmy 200 zestawów danych eksperymentalnych?

³ Michał Spirzewskia, Henryk Anglart, Paweł M. Stano, Uncertainty and sensitivity analysis of a phenomenological dryout model implemented in DARIA system code Nuclear Engineering and Design 355 (2019) 110281

⁴ Fragment z rozprawy, strona 109:

Only 173 experimental cases in the considered experimental range have been used in a derivation of the new IEF correlation, as described below. Next, the entire database of 554 cases in whole range of operating conditions was used for the model testing

Kończąc recenzję pragnę dodać komentarz odnośnie analiz bezpieczeństwa reaktorów jądrowych. Jak wspomniano pierwsze wyjaśnienie terminu „Best-Estimate model” jest podane na stronie 30. Pada ono w kontekście dyskusji procesu licencjonowania reaktorów, gdy w rozprawie stwierdzono, że po roku 1988 w procesie licencjonowania dopuszczono analizy realistyczne, czyli Best-Estimate, co może błędnie sugerować, że po roku 1988 zmniejszono rygory bezpieczeństwa w energetyce jądrowej. Można przypuszczać, że doktorantowi chodziło o procedury licencjonowania w USA, gdzie w 1989 roku NRC wydała dokument REGULATORY GUIDE 1.157⁵ w którym wskazano okoliczności, gdy można odejść od analiz konserwatywnych (czyli pesymistycznych) na rzecz analiz realistycznych (czyli Best-Estimate). Okoliczności te są omówione przez autora rozprawy. Natomiast warto zauważyć jak w praktyce działa procedura licencjonowania na przykładzie obecnie prowadzonego postępowania dla reaktora NuScale. W przytoczonym poniżej przypisie⁶ opisana jest sytuacja, gdy NRC zaakceptowała analizę realistyczną dostarczoną przez oferenta technologii, ale dopiero wówczas, gdy samodzielnie przeprowadziła dodatkowe badania.

Powyższe uwagi krytyczne, ani komentarz w żaden sposób nie zmniejszają bardzo dobrej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej i wnoszą o jej wyróżnienie.

Podsumowując uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie ustawowe warunki stawiane pracom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie magistra inżyniera Michała Spirzewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Ludwik Pieńkowski

⁵ REGULATORY GUIDE 1.157, may 1989,
<https://www.nrc.gov/docs/ML0037/ML003739584.pdf>

⁶ SAFETY EVALUATION OF THE NUSCALE POWER, LLC TOPICAL REPORT, TR-0915-17564-P, REVISION 1, “SUBCHANNEL ANALYSIS METHODOLOGY”, September 26, 2018,
<https://www.nrc.gov/docs/ML1827/ML18270A383.pdf>

fragment:

“The ninth condition is to justify or quantify the input selections for licensing applications as the default values recommended by the code developers are for best-estimate use only. The staff performed confirmatory analyses on inlet flow boundary conditions for consistency with NRELAP5 and inlet flow sensitivity to thermal margins. Results allowed the staff to conclude that the deterministic, conservatively-biased treatment of uncertainties was appropriate, hence Condition 9 was met.”