

Kraków, 19 lipca 2021 r.

Dr hab. Ludwik Pieńkowski, profesor AGH

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 Rafała Bryka  
p.t.: "New Methods in modeling of processes in passive safety systems in a  
III+ generation BWR"**

Rozszczepienie jądra atomowego, jego podział na dwa porównywalnie duże fragmenty uwalnia część energii wiązania jądra w postaci elektrostatycznie odpychających się dwóch jąder mniejszych. Ich hamowania w materii transformuje energię mechaniczną na energię cieplną. Niezmiernie krótka droga hamowania, mniejsza niż jeden milimetr powoduje, że w takich reaktorach jak BWR ciepło jest generowane w prętach paliwowych. Skuteczny odbiór ciepła i jego wykorzystanie w energetyce wymaga odpowiedniego systemu chłodzenia prętów, całego rdzenia reaktora. Drugim, równie ważnym zadaniem systemu chłodzenia jest zapewnienie bezpieczeństwa rdzenia reaktora, wychłodzenie go nawet w ekstremalnie trudnych warunkach awaryjnych. Zadanie to jest trudne, jest wciąż wyzwaniem nawet dla wykorzystywanych od dziesięcioleci reaktorów BWR i dlatego należy uznać, że podjęty w rozprawie temat jest aktualny i istotny.

Autor rozprawy przedstawia nowatorskie, hybrydowe podejście do modelowania skomplikowanych procesów chłodzenia rdzenia reaktora. Stawia sobie za cel budowę nowego modelu z wykorzystaniem współczesnych narzędzi informatycznych opartych na obiektowym języku programowania Modelica, który oferuje też możliwość wykorzystania sprawdzonych rozwiązań oraz dużych zbiorów danych, ich integrację z nowymi strukturami w jedną, większą, spójną całość. Merytoryczna część rozprawy poprzedzona jest klarownym wstępem, gdzie pokazano kluczową rolę modelowania procesów termo-hydraulicznych w energetyce jądrowej. W opisie tym podkreślono istotę walidacji modeli poprzez wielostopniowe konfrontowanie przewidywań z wynikami pomiarów

- Dane z elementarnych urządzeń wykorzystywane są do budowania modeli i kodów.
- Dane z obiektów złożonych, w których w zmniejszonej skali odtwarzane są systemy elektrowni wykorzystywane są do badania jak model sprzęga systemy o niewielkiej złożoności.
- Wyniki pomiarów pozyskane z wielkoskalowych, zintegrowanych testowych obiektów wykorzystywane są do sprawdzenia możliwości kodów. Jak podkreśla Autor etap ten jest kluczowy w procesie walidacji modeli i kodów
- Wyniki pomiarów z działających elektrowni jądrowych, które z oczywistych powodów ograniczone są jedynie do łagodnych stanów nieustalonych i które również służą do badania poprawności modeli i kodów.



W rozdziale drugim przedstawiona jest ogólna charakterystyka reaktorów wrzących trzeciej generacji a następnie projektu reaktora KERENA firmy Framatome mającego zasilać blok energetyczny o mocy 1250 MW. Przedstawiono charakterystykę czterech pasywnych systemów bezpieczeństwa wskazując, że z punktu widzenia budowania modeli najciekawsze są dwa i one zostały wybrane do dalszych prac: Emergency Condenser (EC) oraz Containment Cooling Condenser, (CCC).

Reaktor KERENA nigdy nie został zbudowany, ale Framatom rozwijając projekt wybudował i uruchomił w Karlstein wielkoskalowe urządzenie testowe Integral Test Facility Karlstein, INKA. W rozprawie szczegółowo opisano jak elementy reaktora KERENE zostały odwzorowane w zestawie INKA podając, że w szczególności zachowano pionowe wymiary w skali 1:1. Natomiast objętość zbiornika reaktora odwzorowano w skali 1:6, a obudowy bezpieczeństwa (containment) w skali 1:24. W rozprawie brakuje jednak zdjęcia zestawu INKA z opisem poszczególnych zbiorników i systemów, co wprost pokazałoby rozmiar przedsięwzięcia, wysiłek przy zbudowaniu urządzenia i jego eksploatacji. Dwa zdjęcia zestawu INKA są zamieszczone w cytowanej referencji [28], która jest publicznie dostępna w Internecie i czytelnik rozprawy z łatwością może do niej sięgnąć. Przedstawione w dalszej części rozprawy wyniki obliczeń modelowych odnoszą się do projektu reaktora KERENA i są konfrontowane z wynikami eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem zestawu INKA. Wyniki nowego modelu porównywano również z wynikami innych modeli.

Rozdział trzeci wprowadza czytelnika w obszar matematycznego modelowania procesów termo-hydraulicznych w reaktorach jądrowych. Krótko przywołana jest historia ostatnich kilkadziesiąt lat modelowania i wymieniono nazwy kilku kodów takich jak RELAP5, TRACE, CATHARE-2 i ATHLET. Kody te osiągnęły znaczny stopień dojrzałości, są nadal rozwijane, a ich wykorzystanie w procesie projektowania i w analizach bezpieczeństwa jest powszechnie akceptowane. Dalej Autor przedstawia założenia tych modeli i ta część pracy ma duży, cenny ładunek dydaktyczny. W przejrzysty sposób przedstawiono jednowymiarowy, dwufazowy model przepływu i jego zapis w odpowiednich równaniach. Dzięki temu niemal wprost widać ograniczenia jednowymiarowego, dwufazowego modelu przepływu stosowane do opisu skomplikowanych, nierównowagowych zjawisk przepływowych z wymianą ciepła zachodzących w rdzeniu reaktora. W kolejnej części przedstawiona jest złożoność procesu implementacji modeli w kodach komputerowym a następnie nakreślone są bariery przy wykorzystaniu kodów. W rozprawie kilkakrotnie podkreślone jest, że to samo zadanie, rozwiązywane za pomocą tych samych narzędzi, ale przez różne zespoły dość często prowadzi do bardzo różnych wyników. Wpływa na to szereg czynników, ale wśród wielu przyczyn natury obiektywnej Autor wskazuje na różne koncepcje nodalizacji układów oraz zawsze niewystarczającą wiedzę o warunkach brzegowych, która jest uzupełniana przez różne zespoły w różny sposób. Wiadomo przecież, że już wybranie optymalnego kroku czasowego obliczeń często sprawia trudność, a dla modelowanych procesów nierównowagowych zawsze jest wyzwaniem.

W rozdziale czwartym pokazano jak nowoczesne metody matematyczne i komputerowe mogą usprawnić modelowanie procesów termo-hydraulicznych. Po pierwsze Autor przekonuje, że obiektowo zorientowane języki programowania dają szansę na znaczne usprawnienie procesu programowania. Kody komputerowe pisane we współczesnym środowisku informatycznym mogą i powinny posiadać modułową, obiektową strukturę, wyposażoną w otwarte interfejsy. Dzięki temu programy będą czytelniejsze, ich pisanie powinno pochłaniać mniej pracy i powinny one działać wydajniej. Do realizacji tak

wyznaczonych celów Autor wybrał i zaprezentował możliwości języka Modelica wraz z jego środowiskiem narzędziowym OpenModelica.

Zawarty w rozprawie opis możliwości języka Modelica wraz ze środowiskiem OpenModelica w czytelny sposób pokazuje szerokie możliwości tego narzędzia. Po pierwsze podkreślono, że język Modelica w swej istocie nie narzuca relacji przyczynowo skutkowej. Jak pokazano, gdy relacja równości nie jest przypisaniem wartości z prawej strony na lewą, to każdy z obiektów po obu stronach równości ma taką samą wagę. Dzięki temu obiekty w języku Modelica zyskują na uniwersalności, mogą być znacznie wydajniej wykorzystywane w procesie budowania kodu komputerowego.

Opis możliwości środowiska Modelica do modelowania procesów termo-hydraulicznych rozpoczyna przegląd literatury. Po pierwsze omówione jest modelowanie reaktora IRIS, którego wyniki opublikowano w 2005 roku. Wykorzystano do tego już wówczas rozwijaną w środowisku OpenModelica bibliotekę ThermoPower oraz zbudowano bibliotekę NUKOMP dedykowaną zagadnieniom jądrowym. Dalej przytoczono opublikowane porównanie wyników modelu w języku i środowisku Modelica z wynikami standardowego kodu RELAP. W rozprawie przedstawiono również wyniki modelowania z wykorzystaniem środowiska Modelica dla projektu reaktora ALFFRED, który jest chłodzony ołowiem. Podkreślono, że środowiska Modelica nikt wcześniej nie wykorzystał do modelowania procesów termo hydraulicznych reaktorów wrzących typu BWR.

Dalej w rozprawie zademonstrowano jak Modelica pozwala na zintegrowanie dobrze sprawdzonych kodów w nowoczesne struktury. Ten ważny cel został osiągnięty poprzez zbudowanie hybrydowego kodu, którego jednym z kluczowych obiektów był program napisany w języku FORTRAN. Jak słusznie podkreśla Autor zachowanie i wykorzystanie istniejących zasobów wiedzy powinno być priorytetem w każdym obszarze badawczym, a Modelica pozwala na wykorzystanie całych modułów z różnych kodów pisanych i sprawdzanych przez dziesięciolecia. Jest to możliwe również dla kodów napisanych w językach o bardzo ograniczonych możliwościach jak na przykład FORTRAN, a szczególnie jego stare wersje sprzed lat. W dalszej części rozprawy pokazane są wprost wskazówki techniczne jak taką integrację różnych kodów wykonać w środowisku Modelica. Inne koncepcję wykorzystania istniejących zasobów wiedzy i sztuki modelowania wymagają przepisania starych kodów źródłowych na nowe, w nowych językach, co jak podkreśla Autor oznacza ogrom pracy programistów i duże ryzyko popełnienia błędów.

W pierwszych czterech rozdziałach rozprawy pokazane są znaczne, potencjalne korzyści wykorzystania języka i środowiska Modelica. W piątym rozdziale zaprezentowano wdrożenie zaproponowanego nowego podejścia do modelowania zjawisk termo-hydraulicznych w reaktorach jądrowych. Zbudowano odpowiednie modele systemów reaktora wrzącego KERENE i uzyskane przewidywania konfrontowano z wynikami eksperymentalnymi w tym uzyskanymi z wielkoskalowego urządzenia testowego INKA.

Budowa i weryfikacja nowego, złożonego podejścia jest wielostopniowa. Rozpoczyna ją zbudowanie i walidowanie w języku i środowisku Modelica modelu opisującego nagłe rozszczelnienie zbiornika reaktora BWR. Autor przedstawia tę część z dużą starannością prowadząc czytelnika od pokazania ogólnej struktury modelu zbiornika reaktora, poprzez opis podstawowych założeń, więzów modelu do prezentacji i dyskusji równań opisujących przebieg modelowanej, nagłej utraty ciśnienia w zbiorniku reaktora. Wprowadzono również dwie różne metody modelowania udziału fazy gazowej. Wyniki modelu, zaczynając od funkcji opisującej zmianę ciśnienia w zbiorniku reaktora w czasie pierwszej minuty po rozszczelnieniu porównano w wartościami doświadczalnymi z wielkoskalowego zestawu

INKA. Następnie pokazano ewolucję poziomów mieszaniny dwufazowej i porównano je z danymi doświadczalnymi oraz z przewidywaniami kodu ATHLET. Uzyskano dobrą zgodność, co jest pierwszym warunkiem na drodze do walidacji modelu. W kolejnym kroku rozwoju modelu został on powiększony o modelowanie systemu awaryjnego chłodzenia (Emergency Condenser, EC), pokazując tym samym możliwości integracyjne w środowisku Modelica. Następnie zademonstrowano możliwość wykorzystania w modelu obiektu napisanego w innym języku, w FORTRANie. W tym celu wykorzystano istniejący model systemu Containment Cooling Condenser (CCC) i zintegrowano go z budowanym modelem w języku i środowisku Modelica. W ostatniej części pokazano możliwości integracyjne języka i środowiska Modelica z dużymi bazami danych. Pokazano w ten sposób jak nowe podejście do modelowania wzmacnia wiarygodność i efektywność pracy, gdy znaczna część wiedzy bazuje na znajomości korelacji eksperymentalnych. Ta część została zilustrowana opisem procesu kondensacji pary wodnej na poziomych strukturach.

Całość pracy kończy zwięzłe podsumowanie, gdzie wymieniono zasadnicze korzyści z nowego podejścia do modelowania procesów termo-hydraulicznych, oparcia modeli o obiektowy język i środowisko Modelica. Dzięki temu praca przy budowaniu modeli jest efektywniejsza, kodowaniu jest mniej pracochłonne, maleje ryzyko błędów użytkownika, zwiększa się szybkości obliczeń oraz możliwość wykorzystania w zintegrowany sposób dobrze ugruntowanych kodów, a modułarna struktura umożliwi budowę hybrydowych, złożonych modeli. Należy też podkreślić, że recenzowana rozprawa napisana jest z należytą starannością językową, redakcyjną i jej lektura daje dużo satysfakcji. Nie umniejszając tych i innych walorów w recenzowanej rozprawie znajduje dwie kwestie wartę omówienia.

- 1) W streszczeniu (str.16), w części głównej (rozdział 5.3, str, 141) oraz w podsumowaniu (str. 168) pada stwierdzenie, tu zacytowane wprost ze streszczenia w języku polskim na stronie 16:

*zewnętrzny kod [napisany w języku FORTRAN] był początkowo przystosowany do obliczeń stanu ustalonego, jednak charakterystyka języka Modelica, opierająca się o obliczenia niestabilne, doprowadziła w bardzo prosty sposób do rozszerzenia zastosowania zewnętrznego kodu o obliczenia procesów dynamicznych.*

Badanie stanów niestabilnych (transient state) zawsze jest wyzwaniem. Jeśli jakiś model opisujący stany ustalone został zakodowany w języku FORTRAN, to każde jego użycie prowadzi jedynie przez stany ustalone. Dynamiczne wykorzystanie takiego kodu w nowoczesnym środowisku języka Modelica daje dynamiczny obraz. Ale czy konkluzja Autora nie idzie zbyt daleko? W jakim stopniu tak uzyskana dynamika modelu hybrydowego opisuje dynamikę fizycznych stanów niestabilnych?

- 2) W rozdziale 4.3 przytoczono przykłady wykorzystania środowiska Modelica do modelowania procesów termo-hydraulicznych w reaktorach IRIS oraz ALFRED. Dla ciśnieniowego reaktora lekkowodnego IRIS przedstawiono jedynie dość stare prace, bo od roku 2005 do 2011 (referencje [45] i [38]). Jak wygląda bardziej współczesny przegląd literatury opisujący wykorzystanie środowiska Modelica w projektowaniu i badaniu reaktora IRIS, ogólniej reaktorów lekkowodnych oraz reaktorów innego typu, takich jak ALFRED? Jakie ośrodki najmocniej rozwijają dziś idee hybrydowego modelowania procesów termo-hydraulicznych z wykorzystaniem nowoczesnych, obiektowo zorientowanych narzędzi informatycznych takich jak Modelica? Czy Framatom kontynuuje badania w tym obszarze?

Autor rozprawy nie uniknął też drobnych błędów, w tym takich jak:

- 1) Rysunek 2.2 na stronie 43 pokazuje uproszczony schemat pasywnych systemów bezpieczeństwa reaktora KERENA. Narysowana jest rura, którą para wodną wyprowadzona jest z reaktora w kierunku turbiny, ale nie pokazano rury, którą woda wraca do reaktora. Taki niefizyczny obraz rozprasza czytelnika, utrudnia zrozumienie istotnych informacji pokazanych na schemacie.
- 2) Autor nie uniknął też drobnych błędów, literówek, jak przy użyciu skrótu PTTT zamiast PPPT (str.43), albo sformułowanie annual-mist zamiast annular-mist (str. 58).

**Powyższe uwagi w żaden sposób nie zmniejszają bardzo dobrej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej i wnoszę o jej wyróżnienie.**

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



Ludwik Pieńkowski