

## Streszczenie rozprawy doktorskiej

mgr inż. Rafał Bryk

temat: ***New methods in modeling of processes in passive safety systems in a III+ generation BWR***

dziedzina: nauki techniczne / nauki inżynieryjno-techniczne

dyscyplina: energetyka / inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

promotor pracy: prof. dr hab. inż. Konrad Świrski - Politechnika Warszawska Wydział MEiL

W niniejszej pracy przedstawiono nowe podejście do modelowania zjawisk ciepło-przepływowych w pasywnych systemach bezpieczeństwa innowacyjnego reaktora jądrowego wodnego wrzącego (ang. Boiling Water Reactor – BWR) generacji III+. Główną ideą, na której opiera się proponowane podejście jest metoda modelowania hybrydowego, która łączy standardowe metody rozwijania modeli z aktualnymi trendami i najlepszymi praktykami w modelowaniu komputerowym, tj. z integracją kodów źródłowych i dużych baz danych. Ponadto w niniejszej pracy przedstawiono nowy model zjawisk ciepło-przepływowych w zbiorniku ciśnieniowym reaktora po awarii utraty chłodziwa. Model ten zbudowano z wykorzystaniem języka modelowania obiektowego Modelica, który został zaprojektowany tak, aby można było w łatwy sposób wdrażać otwarte interfejsy modeli, co jest fundamentalną cechą w kontekście hybrydowego modelowania opartego o integrację zewnętrznych modeli i baz danych.

Zamierzeniem pracy było przedstawienie alternatywnej metody rozwiązywania zagadnień ciepło-przepływowych, która z jednej strony ułatwiłaby i zoptymalizowałaby wykorzystanie dotychczasowych osiągnięć nauki w tej dziedzinie, a z drugiej stanowiłaby odpowiedź na problemy spotykane podczas modelowania przy pomocy obecnie stosowanych metod. Celem wykonania nowego modelu zjawisk ciepło-przepływowych w zbiorniku ciśnieniowym w przypadku nagłego spadku ciśnienia było stworzenie dokładniejszego i szybszego modelu zjawisk ważnych z punktu widzenia działania pasywnych systemów bezpieczeństwa reaktora typu BWR.

Reaktor jądrowy BWR jest drugą po reaktorze ciśnieniowym (ang. Pressurized Water Reactor – PWR) najbardziej rozpowszechnioną technologią pozyskiwania energii elektrycznej z reakcji łańcuchowej rozszczepienia jąder atomów ciężkich. Obecnie na świecie pracują 64 bloki BWR, a dzięki doświadczeniu w eksploatacji sięgającemu lat 50-tych ubiegłego wieku technologia ta stała się jedną z najbezpieczniejszych metod generacji energii elektrycznej. Podczas kilku dekad rozwoju tej technologii projekty reaktorów ewoluowały stanowiąc tym samym nowe generacje reaktorów projektowanych jako reaktory wrzące. Obecnie rozwijane projekty, stanowiące tzw. generację III+, mają głównie na celu zapewnienie pasywnego bezpieczeństwa nowobudowanych jednostek. Koncepcja pasywnego bezpieczeństwa powstała po wnikliwych analizach wypadków które miały miejsce w niemal siedemdziesięcioletniej historii eksploatacji bloków jądrowych. Zakłada ona, że niezależnie od przyjętego scenariusza awarii w elektrowni jądrowej chłodzenie rdzenia pozostanie niezagrażone dzięki naturalnie występującym zjawiskom lub siłom takim jak konwekcja swobodna lub grawitacja. Podejście to eliminuje zatem konieczność rozwijania złożonych systemów składających się z wielu urządzeń napędzanych przy pomocy silników, które zasilane są z sieci elektrycznej lub przy użyciu generatorów awaryjnych. Jednocześnie zredukowana zostaje ilość instrukcji i procedur prowadząc tym samym do zminimalizowania prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora reaktora, co jak pokazuje historia było główną przyczyną awarii w elektrowniach jądrowych.

Jednym z nowatorskich rozwiązań projektowych generacji III+ w technologii BWR jest reaktor KERENA zaprojektowany przez firmę Framatome przy współpracy z kilkoma podmiotami rynku energii elektrycznej i instytucjami technologicznymi. KERENA jest reaktorem o mocy 1250 MWe, którego projekt został oparty o integrację najlepszego stanu wiedzy i doświadczenia pozyskanego przy eksploatacji istniejącej floty BWR z nowymi rozwiązaniami w zakresie poszczególnych systemów. Szczególną uwagę przy projektowaniu reaktora poświęcono na implementację koncepcji pasywnego bezpieczeństwa. Zostało to odzwierciedlone przez zawarcie w projekcie kilku systemów pasywnych pozwalających na bezpieczne wyłączenie i sprowadzenie reaktora do tzw. stanu zimnego niezależnie od postulowanej awarii.

Jednym z kluczowych elementów właściwego zaprojektowania systemu spełniającego określoną rolę jest jego wcześniejsze zamodelowanie oraz symulacja zjawisk, które mogą wystąpić w tym systemie. W energetyce jądrowej symulacja procesów odgrywa jednak dużo istotniejszą rolę, ponieważ jej zalety wykorzystywane są także w późniejszej fazie do analiz różnego rodzaju awarii, które nie mogą być zbadane empirycznie ze względów ekonomicznych oraz z uwagi na bezpieczeństwo reaktora. Ponadto modele matematyczne wykorzystywane są także przy opracowywaniu wielu dokumentów operacyjnych związanych z bezpiecznym użytkowaniem bloku, np. instrukcji obsługi, procedur awaryjnych, a także przy identyfikacji marginesów bezpieczeństwa.

Podczas ostatnich 50 lat badań w zakresie wspomaganego komputerowo modelowania i symulacji procesów ciepło-przepływowych w reaktorach jądrowych opracowano kilka kodów stanowiących obecnie najlepszy stan wiedzy w tym zakresie. Kody te osiągnęły w tym czasie wysoką dojrzałość i zadowalającą precyzję przy przewidywaniu poszczególnych zjawisk oraz całościowego zachowania reaktora. Tym samym są one obecnie szeroko implementowane w fazie projektowania reaktorów dla przeprowadzenia różnego rodzaju analiz w procesie licencjonowania jednostki.

Pomimo że modelowanie jako takie służy w dużej mierze do eliminacji konieczności badań eksperymentalnych, badania te dalej stanowią nieodzowną część rozwoju modeli. Fakt, że modelowanie w dużym stopniu przyczynia się do ograniczenia rozwoju iteracyjną metodą prób i błędów nie oznacza, że może ono całkowicie zastąpić analizy empiryczne – przynajmniej nie w ciągu najbliższych dekad. W gruncie rzeczy obecny ogólny trend przy modelowaniu zjawisk i procesów w różnych dziedzinach wskazuje, że implementacja wielkich baz danych, tak aby model rozpoznawał poszczególne przedmioty lub przewidywał przebiegi procesów może stać się jedną z głównych strategii modelowania w przyszłości. Ten trend, jak również to, ile zrobiono w zakresie analiz eksperymentalnych w energetyce jądrowej na przestrzeni ostatnich dekad stanowią jeden z fundamentów niniejszej pracy.

Rozwój obecnego najlepszego stanu wiedzy w zakresie modelowania był zatem napędzany nie tylko dekadami lat pracy w zakresie modelowania samego w sobie, ale również szeroko zakrojonych programów eksperymentalnych. Początkowo, w trakcie rozwoju kodów, wyniki badań eksperymentalnych były używane do implementacji wielu uproszczeń, założeń i równań empirycznych w celu sporządzenia modelu określonego zjawiska. Następnie jednym z kluczowych elementów rozwoju kodu była jego walidacja, tj. porównanie wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi. Paradoksalnie odwzorowanie wyników rzeczywistych pozostaje bardzo wymagającym zadaniem, co prowadzi do pytań w kontekście alternatywnego wykorzystania istniejących danych eksperymentalnych dla uzyskania odpowiedzi na trudności związane z użytkowaniem obecnych kodów.

Podążając za trendem zaobserwowanym w innych branżach i biorąc pod uwagę stale rosnącą bazę danych eksperymentalnych można sformułować hipotezę, że bezpośrednia implementacja danych z modelem może przynieść wymierne korzyści. Dlatego właśnie jednym z elementów podejścia do modelowania prezentowanego i badanego w niniejszej pracy jest integracja standardowych metod modelowania z zewnętrznymi bazami danych w celu osiągnięcia następujących korzyści:

- Zwiększona dokładność otrzymanych wyników;
- Ułatwienie symulacji problematycznych zjawisk ciepło-przepływowch;
- Ułatwienie modelowania efektów wielowymiarowych;
- Ograniczenie efektu użytkownika wynikającego z dużej liczby parametrów, które muszą być podane do modelu na podstawie indywidualnej oceny użytkowników, która może różnić się w zależności od ich wiedzy i doświadczenia.

Oprócz metodologii opartych o tworzenie dużych baz danych, innym kierunkiem obranym przez ekspertów branży energetyki jądrowej w celu poprawy możliwości i dokładności modelowania jest integracja różnych kodów obliczeniowych. Główną korzyścią wynikającą z łączenia kodów jest eliminacja problemów związanych z użytkowaniem kilku kodów niezależnie od siebie oraz wykorzystanie najlepszych cech poszczególnych modeli w ramach jednego zintegrowanego kodu. Na dalsze zalety tego podejścia składają się:

- Ułatwienie precyzyjnych obliczeń na poziomie interdyscyplinarnym;
- Szybsze, bardziej niezawodne i dokładniejsze obliczenia dzięki zautomatyzowanej wymianie danych stycznych dla różnych kodów i modeli;
- Minimalizacja czasu i kosztów modelowania dzięki ukierunkowaniu prac na punkty styku poszczególnych modeli;
- Zachowanie i lepsze wykorzystanie istniejącego zweryfikowanego stanu wiedzy oraz uniknięcie czasochłonnego rozwijania takich samych modeli przy użyciu innych narzędzi;
- Minimalizacja niepewności związanych z efektem użytkownika, ponieważ istniejąca wiedza jest właściwa dla zintegrowanych kodów;
- Redukcja niepotrzebnych marginesów i niepewności związanych z mniej dokładnymi obliczeniami poszczególnych kodów.

Koncepcja łączenia kodów była początkowo wprowadzona dla integracji kodów reprezentujących różne dziedziny, np. neutronikę i obliczenia wymiany ciepła. Implementacja tego podejścia w ramach jednej dyscypliny jaką jest symulacja procesów ciepło-przepływowch ma na celu zachowanie i lepsze wykorzystanie najlepszych dotychczasowych osiągnięć przy jednoczesnej eliminacji lub zminimalizowaniu wad obecnie stosowanych rozwiązań. Ze względu na fakt, że kody obliczeniowe w energetyce jądrowej były rozwijane od kilku dekad i nie są one oparte o nowoczesne metody modelowania, używanie ich jest często bardzo trudne, czasochłonne i podatne na błędy. Prowadzi to tym samym do występowania silnych efektów użytkownika, objawiających się tym, że różnie użytkownicy tego samego kodu, którzy mają za zadanie zamodelowanie tego samego systemu z wykorzystaniem tych samych danych, założeń i warunków brzegowych otrzymują bardzo często znacznie różniące się od siebie wyniki. Samo przygotowanie danych i parametrów wejściowych wymaga podanie setek, a nawet tysięcy parametrów jeden po drugim, co stanowi potencjalne źródło pomyłek, jeśli zadanie to nie zostanie wykonane z należytą starannością. Tak mozolne przygotowanie każdego modelu jest oczywiście również czasochłonne, co prowadzi również do wzrostu kosztów modelowania.

Innym argumentem przekonującym do wdrożenia podejścia opartego o integrację kodów w ramach obliczeń ciepło-przepływowch jest mnogość istniejących kodów, które zostały rozwinięte przez różne uniwersytety, centra techniczne i firmy. Jednostki te posiadają wiedzę na różnych poziomach lub w różnych obszarach specjalizując się lub posiadając szczególne doświadczenie w zakresie konkretnych zjawisk. Różne instytucje wymieniają się zatem swoją wiedzą i doświadczeniem, a czasem nawet samymi kodami obliczeniowymi. Dlatego właśnie implementacja uniwersalnej platformy dla łączenia różnych kodów jest obiecującym podejściem w kontekście wzrostu efektywności łączenia kodów oraz redukcji potencjalnych błędów, które mogą wystąpić przy wymianie know-how.

Tym samym niniejsza praca opisuje metodykę modelowania opartą o najlepsze praktyki, rekomendacje i przyszłe trendy w zakresie modelowania zjawisk. Przedstawione podejście wykorzystuje narzędzie pozwalające na rozwijanie modeli w

standardowy sposób z wykorzystaniem nowoczesnych metod modelowania, a jednocześnie zakłada łączenie kodów sporządzonych w innych językach oraz integrację dużych baz danych.

Zaproponowana metoda została wykorzystana przy modelowaniu pasywnych systemów bezpieczeństwa reaktora KERENA, a wyniki symulacji zostały porównane z testami przeprowadzonymi na obiekcie testowym INKA, który odwzorowuje projekt reaktora. Jako język modelowania w pracy wykorzystano język Modelica i środowisko OpenModelica. Przegląd literaturowy pokazał, że zarówno język jak i środowisko spełnia wymagania postawione w celu implementacji zaproponowanej metodologii modelowania. W związku z tym, że literatura nie przedstawia jednak przypadków zastosowania języka dla modelowania złożonych zjawisk w zbiorniku ciśnieniowym reaktora i w pasywnych systemach bezpieczeństwa, pierwsze dwa kroki w pracy obejmowały sporządzenie dwóch modeli przy użyciu wyłącznie języka Modelica i bez implementacji zewnętrznych kodów lub baz danych.

Celem pierwszego etapu prac było stworzenie bardziej dokładnego i szybszego modelu zjawisk występujących w zbiorniku ciśnieniowym po awarii utraty chłodziwa. Dla zademonstrowania możliwości modelu otrzymane wyniki symulacji zostały porównane z danymi eksperymentalnymi i z rezultatami otrzymanymi przy wykorzystaniu kodu ATHLET, stanowiącego obecnie najlepszy stan wiedzy. Drugi krok pracy obejmował wykonanie modelu kondensatora awaryjnego – pasywnego systemu bezpieczeństwa, w który wyposażony jest reaktor KERENA. Celem drugiego modelu było wykorzystanie zalet modelowania obiektowego przy tworzeniu modeli systemów pasywnych oraz odwzorowanie całościowego oddziaływania systemów połączonych, jakimi są zbiornik ciśnieniowy reaktora i kondensator awaryjny. Wyniki symulacji obu modeli sporządzonych standardową metodą modelowania przedstawione w niniejszej pracy pokazują bardzo dobrą zgodność obliczeń z wynikami testów na obiekcie testowym INKA.

Trzecim krokiem pracy mającym na celu implementację zaproponowanego podejścia hybrydowego była integracja języka Modelica z zewnętrznym kodem obliczeniowym rozwiniętym przez firmę Framatome. Kod ten został opracowany w języku FORTRAN na podstawie doświadczeń zdobytych podczas dekad prowadzonych badań w zakresie procesów ciepłno-przepływowych. Wyniki osiągnięte dzięki symulacji połączonych kodów potwierdzają korzyści płynące z zaproponowanej metody. Przede wszystkim połączenie kodów doprowadziło do znacznego uproszczenia zastosowania zaawansowanego kodu w języku FORTRAN przy złożonych systemach. Pomimo swojego bardzo wysokiego poziomu merytorycznego możliwości wykorzystania zewnętrznego kodu sprowadzały się do prostych modeli przepływu. Połączenie kodów umożliwiło łatwe budowanie dużo bardziej skomplikowanych systemów przy zachowaniu wysokich standardów i precyzji kodu zewnętrznego. Połączenie modeli doprowadziło ponadto do efektów synergicznych. Oprócz wspomnianego wzrostu możliwości modelowania złożonych zjawisk dzięki implementacji kodu zewnętrznego, rozszerzony został zakres możliwości stosowania tego kodu o obliczenia nieustalone. Mianowicie, zewnętrzny kod był początkowo przystosowany do obliczeń stanu ustalonego, jednak charakterystyka języka Modelica, opierająca się o obliczenia nieustalone, doprowadziła w bardzo prosty sposób do rozszerzenia zastosowania zewnętrznego kodu o obliczenia procesów dynamicznych. Prace przy modelowaniu dla osiągnięcia wymienionych korzyści sprowadzały się jedynie do przygotowania odpowiednich interfejsów dla połączenia obu kodów. Rozwinięcie tak zaawansowanego kodu, jakim jest zewnętrzny kod w języku FORTRAN, w nowoczesnym środowisku modelowania byłoby dużo bardziej czasochłonne i kosztowne.

Ostatnim etapem prac nad implementacją zaproponowanego podejścia była integracja zewnętrznych baz danych dla odwzorowania złożonych zjawisk występujących w kondensatorze odprowadzającym ciepło z wnętrza obudowy bezpieczeństwa reaktora w przypadku awarii utraty chłodziwa. Procesy występujące w tym kondensatorze charakteryzują się bardzo dużą zmiennością przepływu i stanowią problem dla modelowania w standardowym podejściu. Implementacja metody opartej o bazy danych pozwoliła na odwzorowanie oscylacyjnej natury przepływu, która wcześniej obserwowana była w trakcie badań eksperymentalnych nad charakterystyką kondensatora.

Otrzymane w niniejszej pracy wyniki potwierdzają zatem, że zaproponowana hybrydowa metoda modelowania przynosi szereg korzyści poprzez:

- Łatwiejsze i wierniejsze odwzorowanie symulowanych zjawisk;
- Bardziej efektywną i łatwiejszą implementację istniejących rozwiązań z użyciem nowych narzędzi modelowania;
- Szybsze i prostsze modelowanie;
- Redukcję efektu użytkownika;
- Szybszą symulację – zmniejszenie czasu obliczeń;
- Wyższą stabilność obliczeń;
- Lepszą dokładność obliczeń dzięki integracji wiarygodnych danych eksperymentalnych – szczególnie przy symulacji skomplikowanych systemów lub scenariuszy awarii;
- Możliwą synergię pomiędzy integrowanymi kodami, co prowadzi do rozszerzenia zastosowania obecnie istniejących rozwiązań;
- Wyznaczenie nowego kierunku prac nad modelowaniem zjawisk ciepłno-przepływowych w energetyce jądrowej, który obejmuje wykorzystanie obecnego najlepszego stanu wiedzy, nowoczesnych narzędzi i metod modelowania oraz zgromadzoną przez dekady doświadczeń bazę danych wyników eksperymentalnych.