



Recenzja pracy doktorskiej
mgr inż. Magdaleny Orszulik
„Modelowanie procesów rozprzestrzeniania się wybranych czynników w obudowie bezpieczeństwa reaktora PWR po awarii LOCA”

1. Dane ogólne

Przedstawiona mi do oceny rozprawa została wykonana pod naukowym kierownictwem prof. dr hab. inż. Jana Składzienia, w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej, a promotorem pomocniczym był dr inż. Adam Fic. Składa się ona z siedmiu ponumerowanych rozdziałów, wykazów rysunków, tabel i ważniejszych oznaczeń, a także załącznika, spisu literatury i dwóch streszczeń w językach polskim i angielskim. Liczy łącznie 138 stron i zawiera 8 tabel oraz 72 rysunki, ilustrujące głównie wyniki obliczeń numerycznych. Cytowane jest 96 pozycji literatury.

Zgodnie z tytułem dotyczy ona numerycznego modelowania procesów rozprzestrzeniania się składników atmosfery w obudowach bezpieczeństwa reaktorów PWR w kolejnych fazach awarii rozszczelnieniowej, polegającej na rozerwaniu pierwotnego układu chłodzenia reaktora, czyli awarii typu LOCA. Autorka pracy koncentruje swoją uwagę na modelowaniu procesów rekombinacji wodoru, analizując szczegółowo działanie pasywnego rekombinatora katalitycznego oraz przebieg procesów termodynamicznych i chemicznych wewnątrz obudowy bezpieczeństwa. Omawiane analizy wykonano wykorzystując profesjonalny kod komercyjny CFD ANSYS FLUENT.

Recenzowana rozprawa ma więc zarówno aspekt poznawczy, jak i wyraźny aspekt aplikacyjny.

2. Uzasadnienie tematyki rozprawy

Możliwość przewidywania przebiegu i skutków potencjalnej awarii typu LOCA ma zasadnicze znaczenie dla oceny bezpieczeństwa pracy istniejących i projektowanych elektrowni jądrowych. W zespole środków stosowanych dla zapewnienia bezpiecznej pracy elektrowni jądrowych ostatnim elementem jest obudowa bezpieczeństwa, której zadaniem jest zatrzymanie wewnątrz niej wycieków substancji radioaktywnych, powstających we wszystkich rodzajach awarii. Najpoważniejszą awarią jest właśnie LOCA, która jest przedmiotem rozważań w recenzowanej rozprawie.

Z oczywistych powodów nie jest tu możliwe wykonanie pełnego eksperymentu fizycznego, nawet w ograniczonej skali. Prowadzi się jedynie badania eksperymentalne dla niewielkich, początkowych fragmentów LOCA. Stąd szczegółowa analiza procesów termodynamicznych i chemicznych, determinujących rozprzestrzenianie się składników radioaktywnych wewnątrz obudowy bezpieczeństwa jest możliwa wyłącznie w oparciu o modelowanie matematyczne i symulację komputerową. Ten kierunek badań naukowych Autorki należy uznać za w pełni uzasadniony.

3. Charakterystyka merytoryczna rozprawy

Celem pracy mgr inż. M. Orszulik było zbadanie możliwości wykorzystania kodów CFD do modelowania matematycznego przebiegu wybranych faz awarii rozszczelnieniowej typu LOCA, a w szczególności analiza procesów rozprzestrzeniania się składników radioaktywnych wodoru w obudowie bezpieczeństwa wodnego reaktora ciśnieniowego. Wszystkie obliczenia wykonano posługując się profesjonalnym kodem obliczeniowym FLUENT. Po ogólnym wprowadzeniu do problemu i określeniu celu pracy (*Rozdział 1*), w *Rozdziale 2* opisano zagrożenia awaryjne występujące w układach z reaktorami wodnymi i przedstawiono sposoby zapobiegania tym zagrożeniom, ze szczególnym uwzględnieniem awarii typu LOCA, polegającej na rozszczelnieniu obiegu pierwotnego i wycieku z niego wody do wnętrza budynku reaktorowego. Uwzględniono także powstawanie i rozprzestrzenianie się wolnego wodoru. Scharakteryzowano również krótko postać obecnych i projektowanych systemów zabezpieczeń. Na końcu tego rozdziału opisano w skrócie przebiegi rzeczywistych, zaistniałych awarii w blokach jądrowych, ze szczególnym uwzględnieniem wydarzeń w Fukushima.

Rozdział 3 poświęcony jest modelowaniu przebiegu wstępnej fazy awarii rozszczelnieniowej LOCA w obudowie bezpieczeństwa reaktora PWR. Awaria ta charakteryzuje się wyciekami do wnętrza obudowy bezpieczeństwa wody o wysokich parametrach, która w wyniku nagłego spadku ciśnienia

gwałtownie odparowuje, a powstała para wodna zaczyna się następnie skraplać w wyniku kontaktu z chłodnymi ścianami elementów wewnętrznych obudowy bezpieczeństwa. W pracy podano wyczerpujący opis istniejących numerycznych kodów obliczeniowych służących do analizy tego typu zjawisk, a następnie, po scharakteryzowaniu przyjętego modelu obliczeniowego, przedstawiono rezultaty obliczeń własnych. Dotyczyły one eksperymentu wykonanego w specjalistycznym laboratorium australijskim, gdzie do zbiornika symulującego obudowę bezpieczeństwa reaktora doprowadzany był strumień odparowującej wody. Dokonano analizy trzech postaci siatki numerycznej, a następnie uzyskane w pracy wyniki obliczeń porównano fragmentarycznie z danymi eksperymentalnymi, otrzymując zadowalającą zgodność wyników. Wybrane rezultaty obliczeń przedstawiono także w postaci graficznej.

W *Rozdziale 4* wykonano obliczenia symulacyjne konfrontowane, jak poprzednio, z wynikami pomiarów, przy czym analizowane zjawiska są tu charakterystyczne dla „rozwinętej” fazy awarii typu LOCA, podczas której do obudowy bezpieczeństwa wydostaje się mieszanina pary wodnej i wodoru. Właściwy eksperyment zrealizowano w laboratorium Uniwersytetu w Seulu, przy czym, ze względów bezpieczeństwa, wodór dopływający do komory symulującej fragment obudowy bezpieczeństwa reaktora zastąpiono helem. Rozpatrzono kilka modeli procesów przepływowych, podobnie jak uprzednio w geometrii dwuwymiarowej, uzyskując jednak – tylko w ograniczonym stopniu – jakościową zgodność z rezultatami pomiarów. Próby wykonania obliczeń w geometrii trójwymiarowej ograniczono jedynie do wstępnej fazy procesu trwającej 4,5 s, ze względu na bardzo długi czas obliczeń numerycznych. Pomimo wykorzystania rozbudowanego systemu komputerowego czas obliczeń był ponad 5 rzędów wielkości wyższy od czasu rzeczywistego.

Główną część pracy stanowią *Rozdziały 5 i 6*, w których analizowano procesy z udziałem wolnego wodoru i ze szczególnym uwzględnieniem możliwości jego usuwania na drodze rekombinacji katalitycznej. W *Rozdziale 5* przedstawiono opis pasywnych rekombinatorów wodoru, stosowane modele kinetyki reakcji wiązania wodoru oraz w skrócie model procesów przepływowych. Szczegółowych obliczeń walidacyjnych dla pionowego, katalitycznego, płytowego rekombinatora wodoru dokonano wykorzystując wyniki eksperymentu zrealizowanego w jednym z ośrodków niemieckich. Sprawdzono poprawność modelu, wykorzystującego wspomniany wcześniej kod FLUENT, dokonując obliczeń dla stanu ustalonego, w geometrii dwuwymiarowej, dla czterech siatek numerycznych, dla pięciu modeli procesów przepływowych oraz dla różnych wartości współczynników dyfuzji molekularnej i współczynnika przewodzenia ciepła dla płynu pomiędzy płytkami rekombinatora, jak też dla różnych wartości charakterystycznej stałej w modelu katalitycznej powierzchniowej reakcji utleniania wodoru. W oparciu o wielowariantowe obliczenia dobrano zestaw charakterystycznych parametrów, dla których przyjęty model obliczeniowy najwierniej odwzorowuje procesy zachodzące w badanym rekombinatorze. Parametrami kontrolnymi były: temperatura płytki środkowej rekombinatora oraz zależne od wysokości udziały molowe wodoru w szczelinach pomiędzy płytkami. Przedstawiono także dwuwymiarowo profil udziału molowego wodoru i pary wodnej, a także rozkład temperatury w rekombinatorze, dla różnych początkowych zawartości wodoru w mieszaninie dopływającej do niego.

Ostatni rozdział o charakterze merytorycznym, *Rozdział 6*, poświęcony jest symulacji pracy zestawu rekombinatorów wodoru w wybranym fragmencie obudowy bezpieczeństwa reaktora wodnego po wystąpieniu awarii typu LOCA, połączonej z wypływem wodoru. Obliczenia wstępne zrealizowano najpierw dla geometrii dwuwymiarowej (*p.6.1*), dla układu dwóch rekombinatorów usytuowanych symetrycznie w wybranej komorze lokalizacji awarii, a wyniki przedstawiono w postaci profili temperatury oraz udziału molowego wodoru i pary wodnej dla dwóch wybranych czasów trwania procesu.

W mojej ocenie, bardziej realistycznie przebieg procesów we fragmencie obudowy bezpieczeństwa z układem rekombinatorów wodoru, po wystąpieniu rozwiniętej fazy awarii LOCA, oddaje model przedstawiony w *p.6.2*. Ma on postać trójwymiarową i symulował przebieg awarii rozszczelnieniowej w wypełnionej początkowo powietrzem wybranej komorze obudowy reaktora PWR. Do rozpatrywanego obszaru dopływa zadany strumień mieszaniny pary wodnej z wodorem, a równocześnie innym otworem następuje wypływ gazów. W rozpatrywanej przestrzeni znajduje się zestaw dwóch lub czterech pasywnych, płytowych rekombinatorów wodoru. W modelu obliczeniowym zastępowano je elementami porowatymi, o odpowiednio dobranych parametrach charakterystycznych. Wyznaczono je w oparciu o wcześniej opracowany i zweryfikowany model rekombinatora tak, aby zapewnione były podobne warunki przepływowe oraz analogiczna intensywność reakcji wiązania wodoru. Takie podejście umożliwiło wykonanie obliczeń kodem FLUENT dla całej rozpatrywanej trójwymiarowej przestrzeni w warunkach nieustalonych. Rozważono dwa przypadki układu z dwoma rekombinatorami

oraz jeden wariant z zestawem czterech rekombinatorów, za każdym razem analizując proces o rzeczywistym czasie trwania nieco ponad 1000 s. Prezentowane wyniki obliczeń mają postać udziału molowego wodoru w strumieniu gazów opuszczających rozpatrywany obszar oraz pól temperatury i udziałów masowych tlenu oraz wodoru w wybranym przekroju rozpatrywanego obszaru. Z przeprowadzonych w tym punkcie obliczeń wynika, że chwilowa efektywność działania rekombinatora, zwłaszcza w początkowym okresie awarii, zależy wyraźnie od jego usytuowania w stosunku do otworu dolotowego. W rozpatrywanym przypadku szczególne znaczenie ma jego odległość od ściany pomieszczenia, gdyż jej zmniejszenie zwiększa intensywność przepływu mieszaniny pary, wodoru i powietrza przez rekombinator. Zastosowany model obliczeniowy może być przydatny do dobierania miejsc usytuowania rekombinatorów wodoru w komorach obudowy bezpieczeństwa.

Na zakończenie pracy podano uwagi końcowe i wnioski, załącznik zawierający podstawowe wzory zaimplementowane w kodzie FLUENT oraz wykaz wykorzystanej literatury.

4. Uwagi krytyczne i ocena pracy

4.1. Uwagi merytoryczne

Za podstawowe osiągnięcia naukowe rozprawy i elementy nowości należy uznać:

- 1) Budowę modelu CFD transportu masy i ciepła w obszarze zamkniętego zbiornika reaktora PWR napełnionego mieszaniną parowo – wodną, połączoną z pogładową interpretacją parowania i kondensacji na poziomie molekularnym.
- 2) Symulację numeryczną dostępnych w literaturze przedmiotu wyników badań eksperymentalnych wraz z krytycznymi analizami niezgodności wyników obliczeń i danych pomiarowych.
- 3) Opracowanie modeli procesów chemicznych i ciepłno–przepływowych zachodzących wewnątrz pasywnych, katalitycznych rekombinatorów wodoru wraz z niezbędnymi obliczeniami walidacyjnymi.
- 4) Symulację 2D i 3D pracy rekombinatorów wodoru poprzez zręczne zastąpienie powierzchni aktywnych ekwiwalentną strukturą porowatą, co umożliwiło dokonanie analizy wpływu rozmieszczenia rekombinatorów wewnątrz obudowy reaktora na intensywność reakcji wiązania wodoru.
- 5) Podjęcie udanej próby zastosowania profesjonalnego kodu komercyjnego FLUENT do 2D i 3D analizy zjawisk fizyko – chemicznych w rekombinatorach wodoru i wewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktora PWR.

Wymienione osiągnięcia szczegółowe doprowadziły w konsekwencji do opracowania:

- a) obliczeniowej metody numerycznej analizy przebiegu kolejnych faz awarii rozszczelnieniowej w układzie reaktora wodnego ciśnieniowego i wykonania przykładowych obliczeń walidacyjnych przy wykorzystaniu rezultatów specjalistycznych pomiarów eksperymentalnych;
- b) modelu obliczeniowego do analizy procesów przepływowych w układzie lokalizacji awarii w przypadku pojawienia się wodoru, a następnie wiązania go w rekombinatorach traktowanych jak elementy porowate. Umożliwia to wykonywanie obliczeń w układzie trójwymiarowym dla złożonego fragmentu układu lokalizacji awarii ze źródłami emisji wodoru i z zadanym systemem rekombinatorów, a wyniki mogą być przydatne do typowania miejsc lokalizacji rekombinatorów.

Zgłaszam następujące uwagi krytyczne do recenzowanej rozprawy:

- 1) Podczas skraplania pary wodnej po wystąpieniu awarii LOCA (*Rozdz. 3*) proces ten występuje głównie na ścianach elementów wewnątrz budynku reaktorowego, a w pracy zastosowano model objętościowy kondensacji pary. Jak jest uzasadnienie dla takiego sposobu postępowania?
- 2) Obliczenia w *p.6.2* wykonano dla stanu nieustalonego w całej rozpatrywanej przestrzeni, podczas gdy stosowany model rekombinatorów w formie przestrzeni porowatej opracowany został przy wykorzystaniu wyników obliczeń dla stanu ustalonego. Na ile uzasadnione jest postępowanie przyjęte w rozprawie?
- 3) Obliczenia można było wykonać z łatwością dla innych zestawów rekombinatorów, niż te rozważane w rozprawie, np. dla dwóch rekombinatorów nr 3 i nr 4 (patrz str.101). Dlaczego nie podjęto tej próby?
- 4) W eksperymencie koreańskim występuje wyłącznie układ gazowy, jednofazowy, zaś w czasie rozwiniętej fazy LOCA w budynku reaktorowym pojawia się wilgoć także w stanie ciekłym. Ekspe-

- ryment ten zatem tylko w przybliżonym stopniu odwzorowuje rzeczywiste procesy w tej fazie awarii rozszczelnieniowej. Proszę o ocenę poprawności zastosowanego w eksperymencie przybliżenia.
- 5) W mojej ocenie *p.3.1* powinien raczej stanowić oddzielny rozdział, gdyż zawiera on literaturowy opis specjalistycznych kodów komputerowych związanych układami lokalizacji awarii w układach reaktorów jądrowych.

4.2 Uwagi redakcyjne

Praca jest zredagowana starannie, tym niemniej Autorka nie ustrzegła się pewnych prostych błędów redakcyjnych. Co ważniejsze wymieniam niżej w mojej recenzji rekomendując ich usunięcie w trakcie przygotowywania publikacji: a) str.8: brak „dynamiczny” przy współczynniku lepkości; b) str.8 i str.9 – oznaczenia procesów parowania i kondensacji takie same jak faz ciekłej i parowej; c) str.21, tabela 2-1: brak zaznaczenia, które źródła wodoru występują podczas normalnej pracy reaktora, a które pojawiają się w stanach awaryjnych; d) str. 25-27: rysunki 2.6 – 2.9 nie są czytelne; e) str. 46: 1% udziału pary wodnej podano molowo czy objętościowo?; f) str. 52: rysunek 5.9 nie został przywołany w tekście rozprawy; g) siatki różnicowe i geometrie wlotowe przyjęte w *p.3.3* należało usystematyzować; h) str.58: w tabeli 4-1 i w tekście użyto minut do oznaczenia czasu, w układzie SI obowiązują sekundy; i) str.65: w tekście powinno być 4.8 zamiast 4.7; j) str.69: we wzorach 5.4, 5.7 i tablicy 5-1 użyto „cm”, w układzie SI obowiązuje „m”; k) str.102: „udziały gramowe” – winno być udziały masowe; l) str.106: w tekście ma być przywołany rys. 6.6, a nie 6.7; m) str.122: w tekście powinno być prawdopodobnie 300 s, a nie 3000 s.

Autorka cytuje w rozprawie liczne schematy i wykresy z publikacji podając źródło. To wystarczy, aby uszanować prawa autora/autorów, natomiast jak idzie o wydawcę, to rzecz wymaga jego pisemnej zgody. Proszę o tym pamiętać publikując dalej wyniki recenzowanej rozprawy.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest wartościową i pracochłonną rozprawą obliczeniową, zawierającą ważne informacje o możliwym przebiegu awarii typu LOCA. Stąd wynikają również cenne wskazówki do projektowania układu lokalizacji rekombinatorów wodoru. Autorka wykazała się znajomością problemów awarii rozszczelnieniowych związanych z eksploatacją reaktorów jądrowych typu PWR oraz głęboką wiedzą na temat procesów chemicznych i ciepłno-przepływowych, które mogą zachodzić w obudowach bezpieczeństwa tych reaktorów, w trakcie awarii rozszczelnieniowej. Konstruując własne modele analizowanych zjawisk Autorka dała świadectwo swych umiejętności modelowania zarówno procesów chemicznych, jak i procesów wymiany masy i ciepła ze zmianą fazy, wraz z umiejętnością posługiwania się zaawansowanymi narzędziami numerycznymi.

W podsumowaniu mojej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Orszulik spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.

