# MODEL NUMERYCZNY I ANALIZA CIEPLNO-PRZEPŁYWOWA EKSPERYMENTU CASP-3

## MAGDALENA PIŁAT, TOMASZ BURY

Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska e-mail: magdalena.u.pilat@polsl.pl, tomasz.bury@polsl.pl

> <u>Streszczenie.</u> W pracy przedstawione zostały wyniki analizy cieplnoprzepływowej eksperymentu fizycznego, którego celem było odtworzenie warunków przepływu ciepła w obudowie bezpieczeństwa wodnego ciśnieniowego reaktora jądrowego po rozszczelnieniu pierwotnego obiegu chłodzenia. Do symulacji wykorzystano komercyjny pakiet CFD Fluent oraz dwuwymiarowe modele rozważanego obiektu.

### 1. WSTĘP

Praca związana jest z cieplno-przepływowa analizą stanów przejściowych i awarii wewnątrz bezpieczeństwa wodnych ciśnieniowych reaktorów jadrowych. Awaria obudów rozszczelnieniowa pierwotnego obiegu chłodzenia reaktora połączona z wyciekiem chłodziwa (loss-of-coolant accident - LOCA) jest jedną z najbardziej niebezpiecznych awarii mogacych wystąpić w tego typu jednostkach. Awaria taka inicjowana jest przez rozerwanie jednego z rurociągów obiegu pierwotnego, w wyniku czego woda chłodząca wypływa z tego obiegu do wnętrza obudowy bezpieczeństwa reaktora, odparowując natychmiast. Z oczywistych względów przebieg awarii typu LOCA nie może być analizowany na drodze eksperymentów fizycznych w pełnej skali. Z tego powodu modelowanie matematyczne i symulacje numeryczne są szeroko wykorzystywane do tego celu.

Jednym z najtrudniejszych zagadnień w zakresie analiz termodynamicznych awarii rozszczelnieniowych jest kwestia wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła od poawaryjnej atmosfery gazowej wewnątrz obudowy bezpieczeństwa do ścian i elementów konstrukcyjnych [1]. Problem ten został szczegółowo zbadany w czasie eksperymentu zrealizowanego na modelu obudowy bezpieczeństwa reaktora wodnego ciśnieniowego w Lucas Heights Research Centre w Sydney. Eksperyment ten oraz jego rezultaty stały się podstawą międzynarodowego projektu badawczego nazwanego Containment Analysis Standard Problem No.3 (CASP-3), [2]. Przeprowadzone doświadczenie zostało zasymulowane przez kilkanaście różnych modeli numerycznych przy udziale grup eksperckich z różnych krajów. Wszystkie zrealizowane do tej pory symulacje zostały jednak wykonane z wykorzystaniem tzw. kodów o parametrach skupionych. Kody takie oparte są na jednowymiarowych modelach zjawisk fizycznych i najczęściej wykorzystują przy tym tzw. metodę stref kontrolnych. Pozwalają one na określenia zmian średnich wartości parametrów termodynamicznych (ciśnienie, temperatura, przepływy substancji i energii) w każdej strefie, przy założeniu doskonałego wymieszania czynników w ramach każdej fazy.

W ramach niniejszych badań podjęto próbę zamodelowania wspomnianego eksperymentu za pomocą techniki CFD. Utworzono kilka dwuwymiarowych modeli najważniejszego elementu stanowiska pomiarowego, a następnie zrealizowano dla nich szereg obliczeń. Głównym celem prowadzonych analiz było sprawdzenie możliwości wykorzystania komercyjnego pakietu CFD do modelowania przepływów dwufazowych w rozpatrywanej domenie obliczeniowej oraz porównanie uzyskanych eksperymentalnie i numerycznie wartości współczynnika wnikania ciepła. Obliczeniowe wartości tego współczynnika okazały się zdecydowanie niższe od wyników pomiarowych, pozostają jednak w dobrej zgodności z wynikami przeprowadzonych wcześniej obliczeń za pomocą kodów o parametrach skupionych.

### 2. PROJEKT CASP-3

#### 2.1. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko zaprojektowano do symulacji przebiegu początkowej fazy awarii LOCA w typowej obudowie bezpieczeństwa reaktora wodnego ciśnieniowego. Ogólny widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Zasadniczy element tego stanowiska to stalowy zbiornik o wysokości około 2,5 m oraz średnicy 0,9 m, symulujący obudowę bezpieczeństwa reaktora. Zbiornik ten umieszczono na konstrukcji nośnej wewnątrz hali laboratoryjnej. Wnętrze zbiornika podzielono na dwie komory (przedziały). Przepływ substancji pomiędzy obiema przestrzeniami następuje poprzez rurkę o średnicy 52 mm, przy czym na dopływie do rurki (przedział A) zamontowana jest płytka z otworem o średnicy 25.64 mm. Chłodziwo jest przygotowywane w zbiorniku ciśnieniowym (woda o ciśnieniu 10,4 MPa i temperaturze 314 °C), a następnie doprowadzane do górnego przedziału modelu obudowy bezpieczeństwa. W przedziale tym zainstalowana jest okrągła przegroda, która zmienia kierunek strugi i powoduje rozprowadzenie czynnika w całej objętości przedziału. Rozwiązanie to zapobiega również krzyżowaniu się strug czynnika przy dopływie do rurki łączącej oba przedziały, [2].



Rys.1. Widok ogólny stanowiska pomiarowego - opracowano na podstawie [2]

W czasie eksperymentu mierzone i rejestrowane są: przepływy substancji, temperatura czynnika i temperatura na powierzchni ścian modelu obudowy, ciśnienie oraz współczynnik wnikania ciepła od gazowej atmosfery w obu przedziałach do ścian. Przekrój modelu obudowy wraz z lokalizacją punktów pomiarowych przedstawiony został na rys. 2.



Rys.2. Przekrój modelu obudowy bezpieczeństwa oraz lokalizacja punktów pomiarowych - opracowano na podstawie [2]

## 2.2. Przebieg doświadczenia

Doświadczenie inicjowane jest przez rozerwanie dysku blokującego przepływ między zbiornikiem ciśnieniowym i komorą A modelu obudowy. W wyniku różnicy ciśnienia woda zawarta w zbiorniku ciśnieniowym dopływając do górnej komory obudowy natychmiast odparowuje. Zbiornik obudowy wypełnia się mieszaniną powietrza i pary wodnej, co powoduje gwałtowny wzrost ciśnienia i temperatury.

Parametr	Wartość
Zbiornik ciśnieniowy	
ciśnienie, kPa	10 400
temperatura, °C	314
masa wody, kg	8.5
Obudowa bezpieczeństwa	
ciśnienie, kPa	100.0
temperatura, °C	16.3
wilgotność względna, %	100
Otoczenie	
ciśnienie, kPa	99.3
temperatura, °C	16.5

Tabela 1. Warunki początkowe dla doświadczenia CASP-3

Rejestracja parametrów mierzonych przez wszystkie czujniki pomiarowe rozpoczęła się na 5 s przed rozerwaniem dysku i prowadzona była w sumie przez 48 s. Właściwa część eksperymentu trwała 43 s. W tabeli 1 zestawiono wartości początkowe najważniejszych parametrów termodynamicznych. Na rysunkach 3 i 4 zaprezentowano z kolei przebieg zmian strumienia masy i entalpii właściwej czynnika wstrzykiwanego do górnej komory modelu obudowy bezpieczeństwa.



do komory A [2,3]

Rys.4. Entalpia właściwa czynnika dopływającego do komory A [2,3]

Opisany eksperyment stał się podstawą międzynarodowego programu, którego celem była walidacja i rozwój kodów komputerowych służących do analizy cieplno-przepływowej awarii rozszczelnieniowych w obudowach bezpieczeństwa wodnych reaktorów jądrowych. Osiem grup eksperckich z różnych przeprowadziło symulację doświadczenia za pomocą posiadanych kodów numerycznych, przy czym wszystkie zrealizowane wówczas obliczenia wykorzystywały tzw. kody o parametrach skupionych. Uczestnicy projektu oznaczonego jako CASP-3 [2,3] szczególną uwagę skupili na problemie sposobu wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła od wewnętrznej atmosfery gazowej do ścian obudowy bezpieczeństwa. W większości przypadków wykorzystywane kody obliczały ten parametr na podstawie wzorów półempirycznych (np. Marshalla-Hollanda, Uchidy) [3].

#### 3. ANALIZA NUMERYCZNA EKSPERYMENTU

#### 3.1. Geometria modelu

Pierwszy krok analizy polegał na zbudowaniu geometrii modelu obudowy bezpieczeństwa wykorzystanego podczas doświadczenia. Zrealizowana do tej pory analiza ograniczona została do modeli dwuwymiarowych. Podczas pracy opracowano kilka modeli, które różniły się stopniem uproszczenia w stosunku do rzeczywistego obiektu. Modele zbudowane zostały w programie Gambit. Geometria modelu wykorzystanego do końcowej analizy zaprezentowana została na rys. 5. Uproszczenie polega na usunięciu króćców znajdujących się na powierzchni bocznej zbiornika, na dennicach górnej i dolnej oraz uproszczenie elementów znajdujących się w miejscu podziału zbiornika. Następnie model ten został dyskretyzowany ze szczególnym zwróceniem uwagi na miejsca wypływu czynnika z dwóch rurek. W tych miejscach siatka została dodatkowo zagęszczona (rys.6).

Siatka numeryczna modelu wykorzystanego do zasadniczych obliczeń składa się z elementów typu triangular, których liczba wynosi 64600 komórek.





Rys.5. Geometria modelu obudowy bezpieczeństwa oraz typy warunków brzegowych



### 3.2. Model numeryczny eksperymentu

Model numeryczny obejmuje podstawowe równania opisujące przepływ płynu wykorzystane przez program Fluent [4], a więc równanie ciągłości:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_{\rm m} + \nabla (\rho_{\rm m} \vec{v}_{\rm m}) = 0, \qquad (1)$$

równanie zachowania pędu:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\rm m} \vec{\upsilon}_{\rm m}) + \nabla (\rho_{\rm m} \vec{\upsilon}_{\rm m} \vec{\upsilon}_{\rm m}) = -\nabla p + \nabla (\vec{\tau}) + \rho_{\rm m} \vec{g}_{\rm m} + \vec{F} , \qquad (2)$$

oraz równanie bilansu energii:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \rho_{k} E_{k}) + \nabla \sum_{k=1}^{n} (\alpha_{k} \vec{\upsilon}_{k} (\rho_{k} E_{k} + p)) = \nabla (k_{eff} \nabla T) + S_{E}.$$
(3)

Model matematyczny uzupełnia baza danych materiałowych z bibliotek programu Fluent, równania warunków brzegowych oraz własne profile stworzone przy wykorzystaniu danych eksperymentalnych. Rodzaje warunków brzegowych wraz z miejscem ich zdefiniowania zostały przedstawione na rys.5.

Dodatkowo przeprowadzono analizę współczynnika wnikania ciepła od wewnętrznej atmosfery do ścianek modelu obudowy. Współczynnik wnikania ciepła wyznaczany jest z definicyjnego równania:

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{\left(T_{i} - T_{w}\right)},\tag{4}$$

przy czym gęstość strumienia ciepła q oraz wartości temperatur płynu  $T_i$  oraz ścianki  $T_w$  są obliczane za pomocą kodu Fluent.

#### 3.3. Obliczenia wstępne

Pierwszy etap obliczeń obejmował analizę procesu ustalonego. Wyznaczona została średnia wartość strumienia masy pary wodnej dopływającej do komory A. W pierwszej fazie przeprowadzono wyłącznie analizę przepływową dla stanu ustalonego oraz stanu nieustalonego, ale przy stałej wartości strumienia masy pary dopływającej do zbiornika. Obliczenia wstępne objęły testy siatki numerycznej oraz wybór warunku brzegowego charakteryzującego dopływ pary do zbiornika. Otrzymane wyniki pozwoliły na stwierdzenie poprawności wykonanej geometrii oraz przyjętych modeli przepływu oraz turbulencji. Na rys. 7 przedstawiono przykładowe pole prędkości uzyskane dla najprostszego modelu numerycznego.



Rys.7. Profil prędkości w analizie procesu ustalonego, m/s (wyniki dla najprostszej analizowanej geometrii)

## 3.4. Obliczenia zasadnicze

Symulacje zasadnicze, dla geometrii modelu przedstawionej na rys. 5, prowadzone były dla stanu nieustalonego i objęły cały czas trwania doświadczenia, czyli 43 sekundy, w czasie których para wodna dopływała przez rurkę zewnętrzną do komory A. Para ta najpierw cyrkulowała w przedziale A, skąd przez rurkę wewnętrzną przepływała do komory B.

W trakcie obliczeń szczególną uwagę zwrócono na zmiany średniej temperatury w przedziałach oraz wartości współczynnika wnikania ciepła od atmosfery wewnątrz zbiornika do ścianek modelu obudowy bezpieczeństwa. Temperatura badana była w kilku punktach, których lokalizacja odpowiada punktom pomiarowym. Przy analizie doświadczenia

realizowanej w ramach [2,3] założono, że wartości temperatury zmierzone w punktach oznaczonych jako AT5 oraz BT3 można uznać za wartości średnie w przedziałach.

Wybrane wyniki obliczeń zasadniczych przedstawiono w kolejnym punkcie, porównując je jednocześnie z danymi eksperymentalnymi.

#### 3.5. Analiza porównawcza

Ostatnim etapem pracy była analiza porównawcza wyników otrzymanych podczas symulacji z wynikami eksperymentalnymi.

Na rys. 8 zaprezentowano wyniki porównania eksperymentalnego i obliczeniowego przebiegu zmian temperatury w punkcie AT5. Wartości obliczeniowe są przeszacowane do około 20 K. Podobnie sytuacja wygląda w innych punktach pomiarowych.



Rys.8. Porównanie przebiegu zmian temperatury w punkcie AT5



Rys.9. Porównanie współczynnika wnikania ciepła

Zasadniczym elementem analizy porównawczej była ocena otrzymanych numerycznie wartości współczynnika wnikania ciepła. Jakościowy przebieg zmian wartości tego parametru w czasie jest podobny do przebiegu doświadczalnego, jednak wartości obliczeniowe są zdecydowanie niższe niż rezultaty eksperymentu (rys. 9). Porównując wyniki uzyskane z pakietu Fluent z rezultatami otrzymanymi wcześniej przez dwóch uczestników projektu CASP-3 widać, że różnica staje się zdecydowanie mniejsza. Zespół włoski korzystał przy obliczeniach z kodu ARIANNA, natomiast Japończycy z kodu RELAP4 Mod. 5 – obydwa kody bazują na jednowymiarowych modelach zjawisk fizycznych.

## 4. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Otrzymany numerycznie obraz zmian temperatury w analizowanych punktach jakościowo zgadza się z wynikami eksperymentalnymi, jednakże wartości otrzymane z obliczeń są o około 20 K wyższe.

Obliczone wartości współczynnika wnikania ciepła natomiast znacznie odbiegają od wyników pomiarowych. Prawdopodobną przyczyną może być ograniczenie analizy do dwóch wymiarów. W analizowanym przypadku podejście takie nie jest wystarczające do odtworzenia rzeczywistych warunków. Inną przyczyną obserwowanych różnic mogą być problemy z odpowiednim modelowaniem przepływów dwufazowych. Uzyskany numerycznie przebieg zmian wartości współczynnika wnikania ciepła wskazuje jednak podobieństwo do rezultatów otrzymanych przez dwóch uczestników projektu CASP-3 korzystających z kodów ARIANNA i RELAP4 Mod5.

Niniejsza praca stanowi efekt wstępnej fazy badań związanych z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania CFD do analizy rozpatrywanego obiektu, z uwzględnieniem przepływów dwufazowych oraz zmiany fazy. Zrealizowana analiza dwuwymiarowa nie pozwala w sposób jednoznaczny ocenić przydatności wykorzystanego oprogramowania do tego typu analiz. Będzie to możliwe po realizacji obliczeń dla trójwymiarowego modelu obudowy bezpieczeństwa.

### LITERATURA

- 1. OECD/NEA-CSNI: International Standard Problems: brief descriptions (1975-1997). OECD CSNI Report NEA/CSNI/R(1997)3, Paris, 1997.
- 2. Marshall J., Holland P.G., and Woodman W.: OECD/CSNI Containment Analysis Standard Problem No. 3. Experimental Results. CASP3-1. OECD, Paris, 1981.
- 3. Marshall J. and Woodman W.: Comparison report on Containment Analysis Standard Problem No. 3. OECD, Paris, 1983.
- 4. Fluent 6.2 Documentation

## CFD MODEL AND THERMAL-HYDRAULICS ANALYSIS OF THE CASP-3 EXPERIMENT

<u>Summary.</u> The paper presents results of thermal-hydraulic analysis of a physical experiment aimed in reconstruction of heat transfer conditions within containment of a pressurized water reactor after a rupture of the primary cooling circuit. The commercial CFD package Fluent has been used for simulations of the experiment. The simulations have been realized for two-dimensional models of the object under consideration.