

SYMPOZJON "MODELOWANIE W MECHANICE"

POLSKIE TOWARZYSTWO MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ

Beskid Śląski, 1990

Adam FIC

Janusz SKOREK

Instytut Techniki Ciepłej

Politechnika Śląska

MODELOWANIE PRZEBIEGU ZJAWISK CIEPLNO-PRZEPLYWOWYCH WENĄTRZ

OBUDOWY BEZPIECZEŃSTWA REAKTORA JĄDROWEGO W WARUNKACH

ROZSZCZELNIENIA OBIEGU PIERWOTNEGO

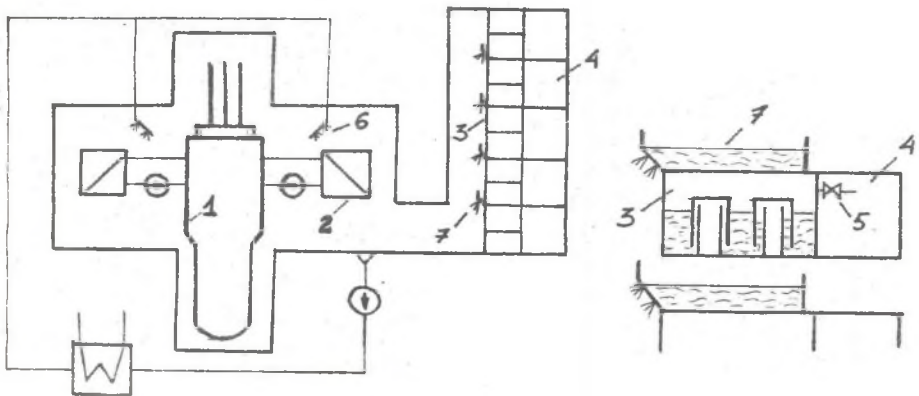
Streszczenie. Omówiono zasadę działania elementów obudowy bezpieczeństwa reaktora jądrowego typu WWR-440 w warunkach rozszczelnienia obiegu pierwotnego (tzw. awaria typu LOCA: Loss-of-Coolant Accident). Przedstawiono założenia modelu matematycznego przebiegu zjawisk termohydraulicznych zachodzących wewnątrz obudowy podczas awarii tego typu. Zaprezentowano przykładowe wyniki obliczeń ciśnień wewnątrz elementów obudowy bezpieczeństwa.

1. Wstęp

Obudowa bezpieczeństwa reaktora (zwana również Układem Lokalizacji Awarii -ULA), która obejmuje cały obieg pierwotny chłodzenia siłowni jądrowej, jest ostatnią barierą uniemożliwiająca przedostawanie się produktów radioaktywnych do otoczenia w warunkach najpoważniejszych awarii reaktora. Jedną z możliwych tego typu awarii siłowni jądrowych jest rozszczelnienie obiegu pierwotnego i wyciek wody chłodzącej (tzw. awaria LOCA). W takim przypadku zewnętrzne ściany obudowy bezpieczeństwa nie powinny ulec uszkodzeniu wskutek wzrostu ciśnienia spowodowanego wypływem

chłodziwa. Ponadto ULA jest często tak zaprojektowany, aby po dostatecznie długim czasie, licznym od początku awarii, zapewnić spadek ciśnienia wewnątrz ULA, poniżej ciśnienia otoczenia. Ma to na celu uniemożliwienie przedostawania się na zewnątrz produktów radioaktywnych.

Schemat ULA reaktora WWR-440 pokazano na rys.1. Ważnym jego elementem jest tzw. wieża lokalizacji awarii z usytuowanymi jedna nad drugą półkami wodnymi (3). Półkę wodną stanowi komora wypełniona roztworem wody i kwasu borowego, połączona z przestrzenią wewnętrzną obudowy zamknięciem syfonowym. Ponadto półki wodne są połączone zaworami zwrotnymi (5) z tzw. pułapkami powietrznymi (4). Zawór zwrotny umożliwia przepływ powietrza i pary wodnej wyłącznie w kierunku od półki wodnej do pułapki powietrznej. W pierwszej fazie awarii typu LOCA następuje gwałtowny wzrost ciśnienia w strefie wypływu chłodziwa. Roztwór powietrza i pary wodnej przepływa przez zamknięcie syfonowe do wnętrza półek wodnych, przy czym następuje prawie



Rys 1. Schemat układu lokalizacji awarii reaktora WWR-440

1-reaktor , 2-wytwornica pary , 3-półka wodna
4-pułapka powietrzna , 5-zawór zwrotny , 6-system
zraszania aktywnego , 7-zbieracz wody

całkowita kondensacja pary wodnej w wodzie wypełniającej półki. Ponadto część roztworu gazowego wpływa do pułapek powietrznych.

Po pewnym czasie wskutek zmniejszania się strumienia wpływającego

chłodziwa i przepływu gazu do półek wodnych i pułapek powietrznych następuje wyrównywanie się ciśnienia w strefach ULA. W pewnym momencie, w wyniku przepływu ciepła do ścian obudowy oraz wskutek działania układu zraszania aktywnego (6) ciśnienie w pomieszczeniach obiegu pierwotnego staje się nieznacznie niższe od ciśnienia wewnątrz półek wodnych. Woda z półek zaczyna być wysysana na zewnątrz, spływa do zbieraczy wody (7) i stąd przez dno siłowe rozpyla się w pomieszczeniach poprzedzających półki. Na skutek kondensacji pary na kropelkach rozpylonej wody zwiększa się objętość właściwa roztworu parowo-gazowego, a co za tym idzie, następuje spadek ciśnienia aż poniżej ciśnienia otoczenia.

Znajomość przebiegów ciśnienia i temperatury wewnątrz ULA jest bardzo istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy siłowni jądrowej. Z oczywistych względów analiza przebiegu zjawisk termicznych wewnątrz ULA jest możliwa wyłącznie za pomocą modelowania matematycznego. Za pomocą modelu matematycznego można też analizować działanie ULA w przypadku awarii pewnych jego elementów.

Do tej pory opracowano szereg modeli matematycznych i programów komputerowych do symulacji zjawisk zachodzących wewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktorów w czasie awarii typu LOCA, np. [1],[2].

W pracach [3],[4] podano odmienną koncepcję opisu zjawisk termodynamicznych, zapewniającą większą dokładność obliczeń.

2. Model zjawisk ciepłno-przepływowych w układzie lokalizacji awarii reaktora

Przestrzeń obudowy bezpieczeństwa reaktora dzieli się na pewną liczbę stref połączonych ze sobą w zadany sposób. W strefie uwzględnia się występowanie dwóch faz: ciekłej (woda) i gazowej (powietrze i para wodna). Stan termiczny strefy określają: ilość powietrza m_a , ilość pary m_p , ilość wody m_w , ciśnienie całkowite p_{tot} , ciśnienie składnikowe pary p_p i powietrza p_a , temperatura wody T_w oraz temperatura gazu T_g . Parametry te związane są równaniami bilansu substancji i energii oraz termicznymi i kalorycznymi równaniami stanu.

Zakłada się, że woda może być w stanie przechłodzenia ($T_w < T_s(p_{tot})$), gdzie T_s jest temperaturą nasycenia odpowiadającą ciśnieniu p_{tot}) lub w stanie nasycenia ($T_w = T_s(p_{tot})$). Gaz natomiast może zawierać parę przegrzaną ($T_g > T_s(p_p)$) lub parę w stanie nasycenia ($T_g = T_s(p_p)$).

Łączącymi strefy otworami następują przepływy powietrza, pary i wody. Możliwy jest też wypływ tych czynników do otoczenia. Do modelowania tych przepływów wykorzystano metodę zastosowaną w [2].

W przypadku przepływu mieszaniny woda-para-powietrze przez zamknięcie wodne półki wodnej zakłada się, że woda i para pozostają w fazie wodnej, zaś powietrze na wyjściu z zamknięcia wodnego przyjmuje temperaturę wody. Uwzględnia się akumulację ciepła w ścianach. Zastosowano dyskretny, jednowymiarowy model wymiany ciepła w tych ścianach [3], wykorzystując metodę bilansów elementarnych.

Zakłada się, że inicjacja stanów nieustalonych następuje w wyniku dopływu do jednej ze stref wody o znanym rozkładzie w czasie natężenia jej wypływu i entalpii właściwej.

Analogiczny w każdym kroku czasowym algorytm obliczeń polega w pierwszym etapie na wyznaczaniu wymienianych przez strefy strumieni mas i energii czynników. Określa się je na podstawie parametrów występujących w strefach na początku kroku czasowego. Stąd wynikają masy m_v , m_p , m_a czynników oraz energie wewnętrzne U_v i U_g faz w strefach. Na tej podstawie, wykorzystując bilanse energii, termiczne i kaloryczne równania stanu, oblicza się pozostałe parametry charakteryzujące stan stref. Uwzględnia się przy tym konwekcyjną wymianę ciepła pomiędzy fazami, a także ewentualną kondensację pary (w stanie nasycenia pary) lub odparowanie wody (w stanie nasycenia wody).

W ważnym praktycznie przypadku, w którym woda jest przechłodzona, zaś para nasycona wykorzystuje się równania:

- bilansu energii fazy gazowej w kroku czasowym:

$$(m_p - m_k) i(T_g) - p_a(T_g) V_g + m_a c_{va}(T_g + 273.15) - U_g + m_k i(T_g) = 0, \quad (1)$$

- bilansu energii fazy ciekłej w kroku czasowym:

$$(m_v + m_k) c_v T_v - m_k i(T_g) - U_v = 0, \quad (2)$$

- stanu dla strefy na końcu kroku czasowego:

$$v_v(T_v) (m_v + m_k) + v(T_g) (m_p - m_k) = 0, \quad (3)$$

gdzie:

v - objętość właściwa,

i - entalpia właściwa,

m_k - masa kondensującej pary.

Powyższe równania stanowią układ nieliniowych równań algebraicznych względem T_g , T_v oraz m_k . Rozwiązuje się go metodą Newtona. Znajdąc rozwiązania dla tych wielkości wyznacza się następnie:

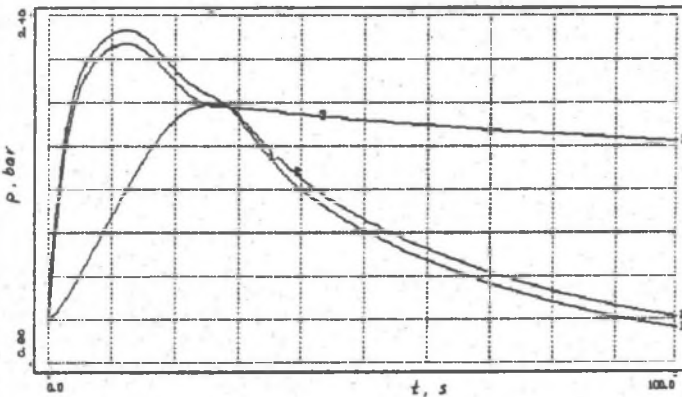
- końcowe ilości czynników $m_{v2} = m_v + m_k$, $m_{p2} = m_p - m_k$, $m_{a2} = m_a$,
- objętość wody $V_v = v_v m_v$.

- objętość gazu $V_g = V_{tot} - V_w$ (V_{tot} - objętość strefy),
 - ciśnienie składnikowe pary $p_p = p_a(T_g)$,
 - ciśnienie składnikowe powietrza $p_a = n_a R_a (T_g + 273.15) / V_g$,
 - ciśnienie całkowite $p_{tot} = p_p + p_a$.
- W pozostałych wariantach stanu wody i pary postępowanie jest podobne.

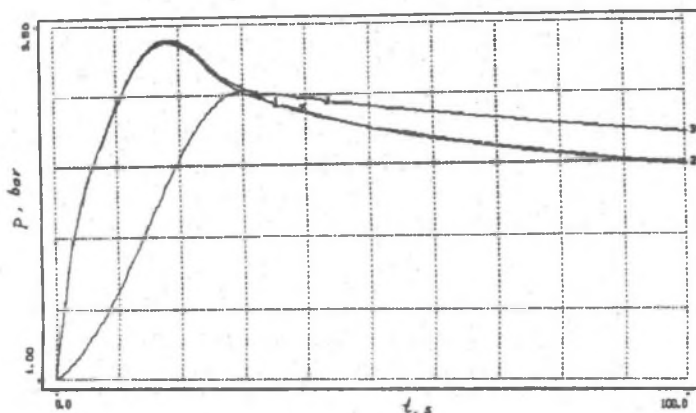
3. Rezultaty obliczeń przykładowych

Obliczenia przykładowe wykonano dla pięcio-strefowego modelu ULA reaktora WWR-440. Strefa 1 obejmuje pomieszczenia obiegu pierwotnego i jest połączona zamknięciem wodnym ze strefami półek wodnych 2 i 3. Strefy 2 i 3 są połączone kanałami zawierającymi zawory zwrotne ze strefami 4 i 5, odpowiednio obejmującymi pułapki powietrzne.

Zmiany w czasie ciśnień całkowitych w strefach po wystąpieniu awarii LOCA w przypadku sprawnie działającego układu lokalizacji awarii pokazano na rys.2. Maksymalne ciśnienie występuje w strefie 1 po około 12 s i wynosi około 0.233 MPa. Ciśnienie w tej strefie dość szybko obniża się i staje się niższe od atmosferycznego. Na rys.3 pokazano dodatkowo przebieg ciśnień w strefach w przypadku, gdyby półki w momencie wystąpienia awarii nie były wypełnione wodą. Występujące w budynku reaktora ciśnienia byłyby wówczas znacznie wyższe i obniżałyby się wyraźnie wolniej.



Rys.2. Zmiany w czasie ciśnień w pomieszczeniach obiegu pierwotnego (1), na półkach wodnych (2) i w pułapkach powietrznych (3)



Rys. 3. Zmiany w czasie ciśnień w pomieszczeniach obiegu pierwotnego (1), na pólkach wodnych (2) i w pułapkach powietrznych (3)

LITERATURA

- [1] BROSCHE E.D.: ZOCO V, a computer code for the calculation of time and space dependent pressure distribution in reactor containment. Nuclear Engineering and Design, 23, (1972).
- [2] CZERNY J., MLADY Z.: HEPRO-2 termodynamicznie nierównowagowy program obliczeniowy do analizy warunków ciśnieniowych i termicznych w strefie szczelnej i w systemie lokalizacji awarii reaktorów WWR-440 oraz pełnościśnieniowych obudowach bezpieczeństwa reaktorów PWR. IEA, Swierk, 1987.
- [3] FIC A., SKŁADZIEN J., SKOREK J., KULIG M.: HEPMOD 1, a computer code for the thermal-hydraulic analysis of WWR-440 containment system: code status and development. Papers of International Conf. of Nuclear Safety Analysis. Berlin, 1989.
- [4] SKŁADZIEN J., FIC A., SKOREK J.: Opracowanie nowej wersji kodu HEPRO-II/pc przeznaczonego do obliczeń ciepłno przepływowych Układu Lokalizacji Awarii elektrowni jądrowej typu WWR-440. Praca badawcza niepublikowana. Gliwice, 1989.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО-ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ВНУТРИ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПОСЛЕ РАЗРЫВА ПЕРВОГО КОНТУРА

Резюме

В работе приводятся основные задания математической модели и программу вычисления давления и температуры в помещениях защитной оболочки ядерного реактора во время аварии LOCA. Приведены тоже результаты прикладных вычислений для атомной электростанции ВВЭР-440.

MODELLING OF THERMAL-HYDRAULIC PHENOMENA OCCURRING IN CONTAINMENT
OF THE NUCLEAR REACTOR IN THE CASE OF LOSS-OF-COOLANT ACCIDENT

Summary

General assumptions of the mathematical model and computer code of calculations of time space dependent pressure and temperature distribution in WWER-440 containment system during LOCA are described. Some numerical examples of pressure distribution within containment are presented.