

Adam FIC
Janusz SKOREK
Politechnika Śląska

ANALIZA AWARYJNYCH PRZEBIEGÓW CIŚNIENIA W UKŁADZIE LOKALIZACJI AWARII
REAKTORA WVER-440

Streszczenie. W pracy omówiono metodę obliczeń parametrów termicznych w układzie lokalizacji awarii reaktora jądrowego po rozszczelnieniu obiegu pierwotnego. Przeanalizowano rezultaty obliczeń przebiegów ciśnienia podczas takiej awarii w bloku z reaktorem WVER-440. Rozpatrywano również sytuacje awaryjne w przypadku występowania niesprawności niektórych elementów układu lokalizacji awarii.

ANALYSIS OF TRANSIENT PRESSURE IN THE CONTAINMENT SYSTEM OF THE VVER-440
REACTOR DURING ACCIDENT

Summary. Method of calculation of thermal parameters in the containment system of nuclear reactor after the leakage of coolant from the primary circuit is described in the paper. Results of calculations of the pressure changes during this accident in the VVER-440 power plant have been analyzed. Accident situations when additionally some elements of containment system are out of order have been considered.

АНАЛИЗ ПРОБЕГОВ ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ АВАРИИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
ВВЭР-440

Резюме. В работе описан метод вычисления термических параметров в системе локализации аварии ядерного реактора после разрыва первого контура. Проанализованы результаты вычислений изменения давления во время этой аварии в электростанции с реактором ВВЭР-440. Рассмотрены тоже аварийные ситуации когда выступаем неправильное действие некоторых элементов системы локализации аварии.

1. WSTĘP

Obudowa bezpieczeństwa reaktora jądrowego (nazywana też układem lokalizacji awarii - ULA) zawiera w swym wnętrzu wszystkie elementy obiegu chłodzenia reaktora [1,2]. Jej ściany są ostatnią barierą zabezpieczającą w warunkach awaryjnych przed wydostaniem się do otoczenia izotopów promieniotwórczych, w tym silnie promieniotwórczych produktów rozszczepienia. Do najpoważniejszych awarii, w trakcie których ULA powinien spełnić to zadanie, należy awaria typu LOCA (Loss of Coolant Accident). Awaria ta polega na rozerwanu rurociągu obiegu pierwotnego i obustronnym wypływie z niego chłodziwa reaktora (wody w reaktorach wodnych) do wnętrza ULA. W efekcie nawet w ciągu około kilkunastu sekund trwania takiej awarii z rurociągu obiegu chłodzenia reaktora wodnego ciśnieniowego wypływa do wnętrza obudowy bezpieczeństwa ponad 80% chłodziwa. Chłodziwo to zawiera dużą ilość radioaktywnych produktów rozszczepienia i aktywacji. Wnętrze ULA zostaje więc wypełnione mieszaniną powietrza, pary, wody i izotopów radioaktywnych. Zewnętrzne ściany ULA nie powinny ulec uszkodzeniu na skutek podwyższonego ciśnienia wewnętrznego. Mimo wysokiej szczelności tych ścian ULA projektowany jest tak, aby możliwie szybko opadało w nim ciśnienie (nawet poniżej ciśnienia atmosferycznego), uniemożliwiając tym samym wydostawanie się na zewnątrz izotopów radioaktywnych. W tym celu układy lokalizacji awarii wyposażone są w specjalne systemy obniżania nadciśnienia: układ zraszania atmosfery obudowy, układ kondensacji pary, układ wentylacji i oczyszczania atmosfery ULA. Zadaniem tego ostatniego jest jednak głównie oczyszczenie atmosfery obudowy z izotopów radioaktywnych

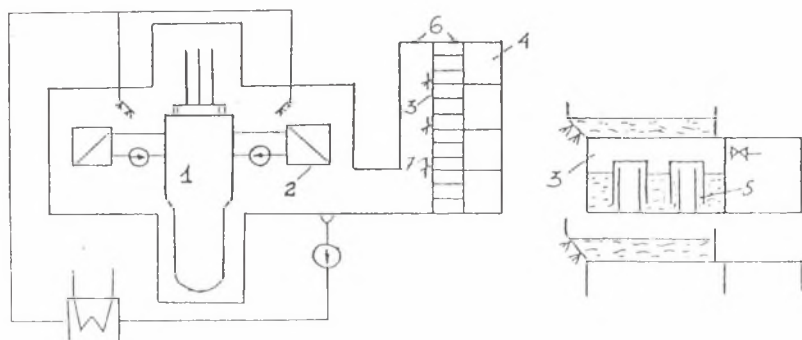
W dalszych fazach awarii (po około 25 min) do wnętrza obudowy przedostaje się wodór powstający w wyniku różnego rodzaju reakcji wody w rdzeniu reaktora. Dodatkowym zagrożeniem staje się wówczas możliwy wybuch wodoru. Aby temu zapobiec, obudowy bezpieczeństwa wyposażone są w układy rekombinacji wodoru.

Zmiany ciśnienia i temperatury wewnątrz ULA w stanach awaryjnych mają podstawowe znaczenie z punktu widzenia zagrożenia środowiska otaczającego elektrownię jądrową (EJ). Z oczywistych względów przebieg tych parametrów może być określany jedynie za pomocą badań modelowych, przede wszystkim zaś za pomocą modelowania matematycznego. Niniejsza praca dotyczy właśnie matematycznego modelowania parametrów termicznych w ULA reaktorów jądrowych po rozszczelnieniu obiegu pierwotnego.

Zaprezentowany model i opracowany program obliczeniowy mają charakter ogólny i mogą być wykorzystywane do obliczeń ULA różnych typów. Rezultaty obliczeń zamieszczone w pracy dotyczą ULA reaktora WWER-440. W Polsce z pew-

nością nie będą instalowane reaktory tego typu. Pracują one jednak w krajach sąsiednich. W przypadku wystąpienia awarii polegającej na rozszczelnieniu obiegu pierwotnego w którymkolwiek z tych reaktorów występuje potencjalne zagrożenie skażeniem terytorium Polski.

Na rys.1. pokazano schemat układu lokalizacji awarii reaktora WVER-440. Elementy obiegu pierwotnego umieszczone są w specjalnych pomieszczeniach stanowiących część ULA. Ważnym elementem układu jest tzw. wieża lokalizacji awarii (WLA) z usytuowanymi jedna nad drugą półkami wodnymi (3). Półkę wodną stanowi komora wypełniona roztworem wody i kwasu borowego połączona z wnętrzem obudowy (a dokładniej z szybem WLA) 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 powietrza.



Rys.1. Schemat układu lokalizacji awarii i reaktora WVER-440

1-reaktor, 2-wytwornica pary, 3-półka wodna, 4-pułapka powietrzna,
5-zamknięcie syfonowe, 6-wieża lokalizacji awarii, 7-zbieracz-rozpylacz

Fig.1. Scheme of containment system of VVER-440 nuclear reactor

1-reactor, 2-steam generator, 3-wetwell, 4-air trap, 5-siphon closure,
6-tower of wetwells, 7-reservoir of atomizer

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 całkowita kondensacja pary wodnej w wodzie wypełniającej półki. Ponadto część roztworu gazowego wpływa do pułapek powietrznych. Z czasem następuje wyrównanie się ciśnienia w strefach ULA. W pewnym momencie, w wyniku odmiennej w różnych strefach intensywności przepływu ciepła do ścian obudowy, 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 rozpyla się w pomieszczeniach ULA. Oprócz tego pomieszczenia wytwornic pary zraszane są wodą rozpylaną od około 60 s przez układ zraszania aktywnego. Na skutek intensywnego ochładzania gazu w szybie WLA i pomieszczeniach wytwornic pary następuje w nich kondensacja pary i spadek ciśnienia aż poniżej otoczenia.

Do tej pory opracowano wiele modeli matematycznych i programów komputerowych obliczeń parametrów termicznych w obudowie bezpieczeństwa reaktorów w czasie awarii typu LOCA, np. [3,4,5,6,7]. W modelach tych zmiany w czasie wszystkich poszukiwanych wielkości (temperatura, ciśnienie, ilości czynników itd.) najczęściej opisuje się układem równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu. Równania te wyprowadza się poprzez różniczkowanie względem czasu podstawowych równań termodynamicznych (np. bilansu energii i równań stanu), a następnie ich linearyzację. Uzyskany układ równań różniczkowych całkuje się później numerycznie. Obliczenia wykazują jednak, że takie postępowanie prowadzi generalnie do wyników, które często nie spełniają z dostateczną dokładnością równań stanu i równań bilansu energii. Utrzymanie niezgodności na rozsądnym poziomie wymaga stosowania niezwykle krótkich kroków całkowania, co bardzo wydłuża czas obliczeń. Problemy te rysują się szczególnie ostro, jeżeli obliczenia realizuje się na komputerach klasy PC.

W pracy podano odmienną koncepcję opisu zjawisk termodynamicznych w ULA, zapewniającą większą dokładność obliczeń. Zastosowana metoda prowadzi do rozwiązywania układu równań nieliniowych opisujących zmiany poszukiwanych wielkości w kolejnych krokach czasowych Δt . Metoda ta, aczkolwiek bardziej czasochłonna od poprzedniej w poszczególnych krokach czasowych, zapewnia automatycznie spełnienie z dostateczną dokładnością przez uzyskiwane wyniki bazowych równań fizykalnych. Umożliwiając stosowanie dłuższych kroków czasowych, w końcowym efekcie staje się bardziej efektywna.

Zastosowany model zjawisk cieplnych w ULA podczas LOCA i metoda obliczeń parametrów termicznych w tym układzie są rozwinięciem modelu i metody zaproponowanych w pracy [4]. Omawiając model i metodę w niniejszej pracy skoncentrowano się na tych ich elementach, które są nowe w porównaniu z zastosowanymi w [4].

Ogólność opracowanego programu obliczeniowego umożliwia obliczanie różnych typów ULA, przy występowaniu różnego rodzaju sytuacji awaryjnych z rozszczelnieniem obiegu pierwotnego chłodzenia reaktora, w tym również przy występowaniu niesprawności wybranych elementów ULA.

2. OGÓLNY OPIS I ZAŁOŻENIA PROGRAMU

Przestrzeń obudowy reaktora dzieli się na pewną liczbę stref połączonych ze sobą w zadany sposób. Podział na strefy powinien odpowiadać rzeczywistemu podziałowi wnętrza ULA na wydzielone objętości. W strefie uwzględnia się występowanie dwóch faz: ciekłej (woda) i gazowej (powietrze, para wodna, wodór). Stan termiczny strefy określają: ilość powietrza G_a , ilość wodoru G_h , ilość wody G_w , ciśnienie całkowite P_{tot} , ciśnienie składowe pary P_p , powietrza P_a i wodoru P_h , temperatura wody t_w oraz temperatura gazu t_g . Parametry te związane są równaniami bilansu substancji i energii oraz termicznymi i kalorycznymi równaniami stanu.

Za autorami prac [3,4] przyjęto równowagę termodynamiczną w obrębie każdej fazy (gaz, ciecz) oraz brak równowagi międzyfazowej. Przyjęto też, że odparowanie cieczy może się odbywać po osiągnięciu temperatury nasycenia dla całkowitego ciśnienia gazu, natomiast kondensacja pary następuje po osiągnięciu temperatury nasycenia odpowiadającej ciśnieniu składowemu pary.

Zakłada się więc, że woda może być w stanie przechodzenia ($t_w < t_s(P_{tot})$), gdzie $t_s(P_{tot})$ jest temperaturą nasycenia odpowiadającą ciśnieniu (P_{tot}) lub w stanie nasycenia ($t_w = t_s(P_{tot})$). Gaz może zawierać parę przegrzaną ($t_g > t_s(P_p)$) lub parę w stanie nasycenia ($t_g = t_s(P_p)$). Stąd wynikają cztery możliwości stanu wody i pary wodnej w strefie:

- woda przechłodzona, para nasycona,
- woda nasycona, para nasycona,
- woda przechłodzona, para przegrzana,
- woda nasycona, para przegrzana.

Uwzględnia się również przypadek: brak cieczy, para przegrzana.

Poszczególne strefy mogą być połączone różnego rodzaju otworami. Łączącymi strefy otworami (otwory o stałym przekroju, otwory o przekroju zależnym od ciśnienia, zawory zwrotne, syfony itd.) następują przepływy czynników. Do modelowania przepływów mieszaniny dwufazowej zastosowano metodę zaczerpniętą z pracy Wallisa [8].

Przepływ mieszaniny parowo-gazowej przez zamknięcie wodne jest zdeterminowany przez różnicę ciśnienia pomiędzy strefami połączonymi zamknięciem wodnym pomniejszoną o ciśnienie hydrostatyczne słupa wody w zamknięciu syfonowym. W przypadku wstecznego wypierania wody z półek wodnych przyjęto, że woda ta zbiera się w zbieraczach wody. Model zraszania WLA wodą ze zbieraczy jest analogiczny do modelu zraszania aktywnego. Wymianę ciepła pomiędzy gazem i opadającymi kroplami charakteryzuje się za pomocą tzw. sprawności zraszania będącej stosunkiem ilości ciepła oddawanego kroplom przez gaz

i maksymalnej możliwej ilości tego ciepła. Zakłada się, że sprawność zraszania jest znana. Oprócz tego przyjmuje się, że nadmiar wody przelewa się ze zbieraczy i przedostaje się do fazy wodnej szybu WLA bez zmiany swej energii wewnętrznej.

Modele przepływu mieszaniny parowo-gazowej przez łączące strefy otwory i zamknięcia wodne opisane są dokładniej w [4].

Model zjawisk cieplno-przepływowych w ULA uwzględnia akumulację ciepła w ścianach. W tym celu zastosowano różnicowy model przepływu ciepła w tych ścianach [5]. Do obliczeń współczynnika wnikania ciepła pomiędzy gazem i ścianami wykorzystano wzór Maschall-Hollanda z ograniczeniem wartości współczynnika do $1590 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [4].

Uwzględnia się wymianę ciepła pomiędzy fazą ciekłą i gazową w strefach, natomiast pomija się dyfuzyjną wymianę masy pomiędzy nimi.

Model nie obejmuje procesów zachodzących w rdzeniu i obiegu chłodzenia reaktora. Zakłada się, że znane jest natężenie wypływu i entalpia właściwa wypływającego chłodziwa z rozszczelnionego rurociągu obiegu chłodzenia.

3. OKREŚLENIE STANU CZYNNIKÓW W STREFACH

Do wyznaczania parametrów czynników w strefach ULA zastosowano metodę bilansową. Polega ona na wykorzystywaniu równań bilansu energii dla przyjętych kroków czasowych i równań wiążących termiczne i kaloryczne parametry stanu dla końców tych kroków. Równania te mają różną postać dla różnych stanów pary i wody w strefach. Rozpatruje się sześć możliwych stanów i pary:

- a) brak wody, para przegrzana,
- b) woda chłodzona, para przegrzana,
- c) woda przechłodzona, para przegrzana,
- d) woda nasycona, para przegrzana,
- e) woda nasycona, para nasycona,
- f) para nasycona, bardzo mało wody ($G_w/G_p < 0.01$).

Ostatni wariant bierze się stąd, że w przypadku wody przechłodzonej i pary nasyconej, przy bardzo małych ilościach wody, proces obliczeniowy staje się rozbieżny, jeżeli przyjmuje się $t_g \neq t_w$.

Równania opisujące niewiadome można dla wariantów a) + e) zapisać w następującej formie ogólnej:

- równanie bilansu energii fazy gazowej w kroku czasowym:

$$F_1 = (G_p + G_{wo} - G_{pk})i_p - p_p V_g + (G_a c_{va} + G_h c_{vh})t_g + \\ + G_{pk} i'_p(t_g) - G_{wo} i''_p(t_w) - U_{g1} - \Delta E_g = 0 \quad (1)$$

- równanie bilansu energii fazy ciekłej w kroku czasowym

$$F_2 = \delta_1 [(G_w - G_{wo} + G_{pk})c_w t_w + G_{wo} i''_p(t_w) - \\ - G_{pk} i'_p(t_g) - U_{w1} - \Delta E_w] = 0 \quad (2)$$

- równanie wyrażające fakt, że suma objętości fazy ciekłej i gazowej w strefie jest równa całkowitej objętości strefy V_{tot} (dotyczy końca kroku czasowego):

$$F_3 = v_w (G_w - G_{wo} + G_{pk}) + v_p (G_p + G_{wo} - G_{pk}) - V_{tot} = 0 \quad (3)$$

- równanie wyrażające prawo Daltona dla końca kroku czasowego (dotyczy jedynie wariantu e):

$$F_4 = \delta_2 [p_a + p_h + p_s(t_g) - p_s(t_w)] = 0 \quad (4)$$

gdzie: i_p, i'_p, i''_p - odpowiednio, entalpia właściwa pary, entalpia właściwa wody w punkcie pęcherzyków i pary w punkcie rosy,

c, c_v - pojemność cieplna właściwa i pojemność cieplna właściwa przy stałej objętości,

G_{wo}, G_{pk} - ilość odparowującej wody i kondensującej pary w kroku czasowym,

U_{w1}, U_{g1} - energia wewnętrzna wody i gazu na początku kroku czasowego,

$\Delta E_w, \Delta E_g$ - energia doprowadzona do fazy wodnej i gazowej podczas kroku czasowego, z wyjątkiem energii doprowadzonej lub odprowadzonej wraz z czynnikiem zmieniającym fazę,

V - objętość,

v - objętość właściwa,

$\delta_1 = 1$ dla wariantów b, c, d, e,

$= 0$ dla wariantu a,

$\delta_2 = 1$ dla wariantu e,

$= 0$ dla wariantów a, b, c, d.

a indeksy dotyczą: a - powietrza, p - pary, h - wodoru, g - gazu (powietrze + para + wodór), w - wody, s - stanu nasycenia, tot - wielkości całkowitej dotyczącej całej strefy.

W wariancie f zakłada się, że $t_g = t_w$, a niewiadomymi są: temperatura gazu t_g oraz ilość kondensującej pary G_{pk} podczas kroku czasowego. Wykorzystuje się równanie bilansu energii dla fazy ciekłej i gazowej:

$$F_1 = (G_p - G_{pk})i_p''(t_g) - p_s(t_g)V_g + (G_a c_{va} + G_h c_{vh})t_g + \\ + (G_w + G_{pk})c_w t_w - U_{g1} - U_{w1} - \Delta E_g - \Delta E_w = 0 \quad (5)$$

oraz równanie (3).

Wszystkie wielkości we wzorach (1) - (5), z wyjątkiem G_{w0} , G_{pk} , U_{g1} , U_{w1} , ΔE_g , ΔE_w , dotyczą końca kroku czasowego. Ilości pary G_p , wody G_w oraz energie doprowadzone do gazu ΔE_g i ΔE_w są określane wstępnie bez uwzględnienia kondensującej pary i odparowującej wody podczas kroku czasowego.

W poszczególnych wariantach różne są niewiadome, ich liczba, liczba obowiązujących równań i ich postać względem niewiadomych. Szczegóły na ten temat można znaleźć w [9].

Nieznane wielkości występujące w równaniach (1) - (5) wyznacza się w analogiczny sposób, kolejno w poszczególnych strefach i krokach czasowych.

W pierwszym etapie oblicza się natężenie przepływu substancji i energii czynników przepływających między strefami, czynników dopływających do stref z zewnątrz (obieg pierwotny chłodzenia, układ zraszania, układ wentylacji), czynników wypływających na zewnątrz (układ wentylacji, otoczenie) oraz strumienie wymiennego ciepła (ze ścianami, pomiędzy fazami). Wielkości te są wyznaczane na podstawie parametrów występujących na początku kroku czasowego.

Na tej podstawie w etapie drugim oblicza się ilości czynników w strefach i energie wewnętrzne na końcu kroku czasowego. Ilości wody i pary oraz ich energie wewnętrzne wyznaczane są wstępnie bez uwzględnienia zmian fazowych podczas kroku czasowego.

W etapie trzecim oblicza się podstawowe niewiadome parametry termodynamiczne w strefach na końcu kroku czasowego. Niewiadome te są zależne od stanu wody i pary w strefach. Są one rozwiązaniem odpowiedniego układu równań wybranych spośród równań (1) - (5). Są to równania nieliniowe i do ich rozwiązania zastosowano metodę Newtona.

W przypadku n nieliniowych równań algebraicznych:

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (6)$$

z n niewiadomymi x_i , gdzie $i = 1, 2, \dots, n$, prowadzi to do układu n równań algebraicznych liniowych:

$$\mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{F} = 0 \quad (7)$$

gdzie:

$\delta \mathbf{x}$ - macierz kolumnowa poprawek δx_i wielkości niewiadomych x_i ,

\mathbf{F} - macierz kolumnowa niezgodności F_i równań (6),

\mathbf{A} - macierz kwadratowa o wyrazach a_{ij} , $i, j=1, 2, \dots, n$, zdefiniowanych następująco:

$$a_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

Obliczenia niewiadomych $x_i = x_i(\tau + \Delta\tau)$ na końcu kroku czasowego, tj. w chwili $\tau + \Delta\tau$, prowadzi się iteracyjnie. W pierwszym przybliżeniu przyjmuje się:

$$x_i^0 = x_i^0(\tau + \Delta\tau) = x_i(\tau) \quad (9)$$

Po obliczeniu z układu (7) poprawek δx_i^k w k-tej iteracji wyznacza się kolejne przybliżenie niewiadomych x_i^k :

$$x_i^k = x_i^{k-1} + \delta x_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Proces ten prowadzony jest w każdym kroku czasowym do osiągnięcia zadanej dokładności wyznaczania niewiadomych x_i .

W ostatnim etapie oblicza się pozostałe nieznanne parametry termodynamiczne w strachch ULA na końcu kroku czasowego (pozostałe ciśnienia, objętości faz, ostateczne ilości wody i pary). Wynikają one z podstawowych praw termodynamiki i oczywistych zależności geometrycznych.

5. ANALIZA REZULTATÓW OBLICZEŃ DLA ULA REAKTORA WWER-440

Za pomocą programu HEPFAL opracowanego na podstawie opisanej metody wykonano serię obliczeń przebiegów parametrów termicznych w ULA reaktora WWER-440 podczas LOCA. Obliczenia wykonano przy założeniu, że wszystkie systemy ULA działają sprawnie (wariant podstawowy) oraz przy występowaniu najbardziej prawdopodobnych niesprawności niektórych spośród tych systemów [10].

W większości przypadków przyjęto dziewięciostrefowy model ULA reaktora WWER-440 (rys.2). Strefy I i II obejmują pomieszczenia zawierające po trzy wytwornice pary, strefa III korytarz łączący pomieszczenia obiegu pierwotnego z WLA, strefa IV szyb WLA, strefa V trzy dolne piętra półek wodnych, strefa VI dziewięć górnych pięter półek wodnych, strefa VII dolną pułapkę powietrzną,

strefa VIII trzy górne pułapki powietrzne, a strefa IX szyb reaktora. W jednym z rozpatrywanych przypadków zastosowano model dziesięciostrefowy. Strefa V z modelu dziesięciostrefowego została w nim podzielona na dwie strefy: jedną obejmującą najniższe piętro półek wodnych oraz drugą obejmującą dwa następne piętra półek wodnych.

Założono, że wypływ wody z rozerwanego rurociągu obiegu chłodzenia reaktora następuje w strefie I. Parametry tego wypływu w początkowym okresie awarii LOCA (do 30s) przyjęto za [11]. W dalszych fazach awarii założono wypływ, którego parametry wynikają z zalewania rdzenia wodą przez układy awaryjnego chłodzenia oraz z generacji w rdzeniu ciepła powyłączeniowego. Przyjęto (z wyjątkiem jednego przypadku), że w okresie od 50 s do 450 s z obiegu wypływa para nasycona sucha w ilości wynikającej z generacji ciepła powyłączeniowego, natomiast po 450 s z obiegu wypływa woda w ilości równej ilości wody doprowadzanej do rdzenia przez układy awaryjnego chłodzenia i o parametrach wynikających z generacji ciepła powyłączeniowego [12].

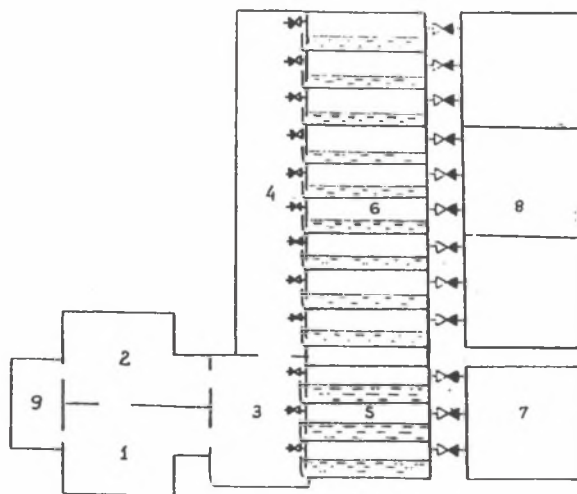
W przyjętym do obliczeń modelu geometrycznym (rys. 2) uwzględniono istniejące we współczesnych ULA reaktorów WWR - 440 połączenie przestrzeni gazowej półek wodnych z szybem WLA kanałem wyposażonym w zawór zwrotny, normalnie otwarty w kierunku szybu WLA, a zamykający się przy ciśnieniu wyższym od 0.167 MPa. Rozwiązanie to jest przewidziane w celu uniknięcia wysysania wody z półek w przypadku niewielkich wycieków wody z obiegu. W przeciwnym razie możliwe powiększenie się wycieku mogłoby nastąpić w sytuacji braku wody na półkach i nie byłoby możliwe skuteczne obniżanie ciśnienia awaryjnego.

5.1. Układ lokalizacji awarii sprawny

Na rys. 3. i 4. pokazano zmiany w czasie ciśnienia i temperatury podczas awarii LOCA w wybranych strefach ULA w przypadku sprawnie działających wszystkich jego elementów. Maksymalne ciśnienie wynosi 0,237 MPa i występuje po 12 s w strefie I (wypływu chłodziwa). W tym okresie przebiegi ciśnienia w pozostałych strefach są podobne z wyjątkiem pułapek powietrznych. Maksymalne ciśnienie w tych strefach jest nieco niższe niż w strefie I. Następnie ciśnienie w nich szybko spada w wyniku kondensacji pary na półkach wodnych, napełniania pułapek powietrznych oraz wnikania ciepła do ścian pomieszczeń ULA. Po około 28 s ciśnienie na półkach wodnych staje się wyższe niż w poprzedzającym je szybie WLA. Dzieje się tak dlatego, że oddawanie ciepła do ścian jest bardziej intensywne w strefach I - IV niż w strefach V - VI (półki wodne). Główną tego przyczyną jest znacznie niższa temperatura gazu na pół-

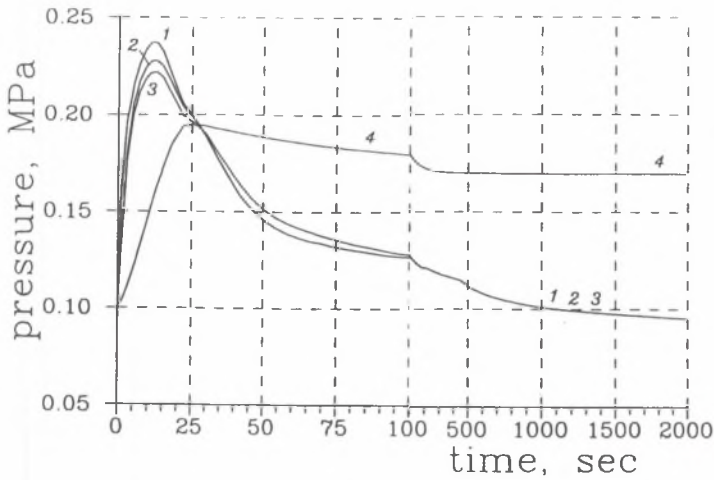
kach niż w pomieszczeniach obiegu pierwotnego i w szybie WLA (rys.4). Następuje wyłaczanie wody z półek wodnych do zbieraczy wody, a następnie samoczynne jej rozpylanie. Zraszanie bierne (trwające do około 180 s) powoduje intensywne ochładzanie gazu w WLA i dalsze obniżanie nadciśnienia w strefach poprzedzających półki. W tym czasie (po około 30 s) zamykają się zawory zwrotne pułapek powietrznych i ciśnienie w nich powoli spada w wyniku oddawania ciepła do ścian. Na obniżanie ciśnienia w pomieszczeniach obiegu pierwotnego i w szybie WLA wpływa też działanie od 60 s układu zraszania aktywnego boksów wytwornic pary. Po około 1100 s ciśnienie spada, z wyjątkiem pułapek powietrznych, poniżej ciśnienia atmosferycznego (tablica 1). Zapobiega to przed wydostaniem się izotopów promieniotwórczych z ULA do otoczenia.

Uzyskane w rozpatrywanym przypadku przebiegi temperatury w wybranych strefach pokazano na rys.3. Maksymalna temperatura równa 124°C występuje w fazie gazowej pierwszej strefy po około 12 s. Gwałtownie w niektórych strefach wzrastające początkowo temperatury po osiągnięciu swych maksimum szybko obniżają się.



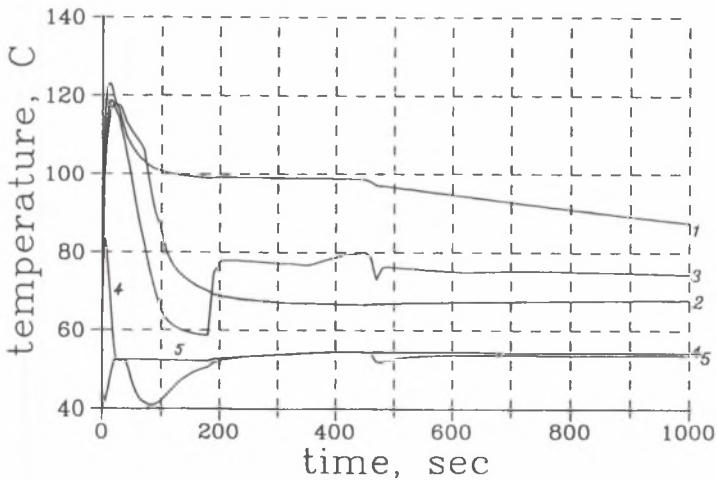
Rys.2. Podział ULA reaktora WVER-440 na strefy

Fig.2. Division of the VVER-440 containment system into zones



Rys. 3. Zmiany ciśnienia przy sprawnie działającym ULA
1-strefa I, 2-strefa III, 3-strefa VI, 4-strefa VIII

Fig. 3. Pressure distribution when containment system works correctly
1-zone I, 2-zone III, 3-zone VI, 4-zone VIII



Rys. 4. Zmiany temperatury gazu i wody przy sprawnie działającym ULA
1-gaz w strefie I, 2-gaz w strefie II, 3-woda w strefie I,
4-gaz w strefie VIII, 5-woda w strefie VIII

Fig. 4. Temperature distribution of gas and water when containment system works correctly
1-gas in zone I, 2-gas in zone II, 3-water in zone I,
4-gas in zone VIII, 5-water in zone VIII

5.2. Niesprawne niektóre systemy ULA

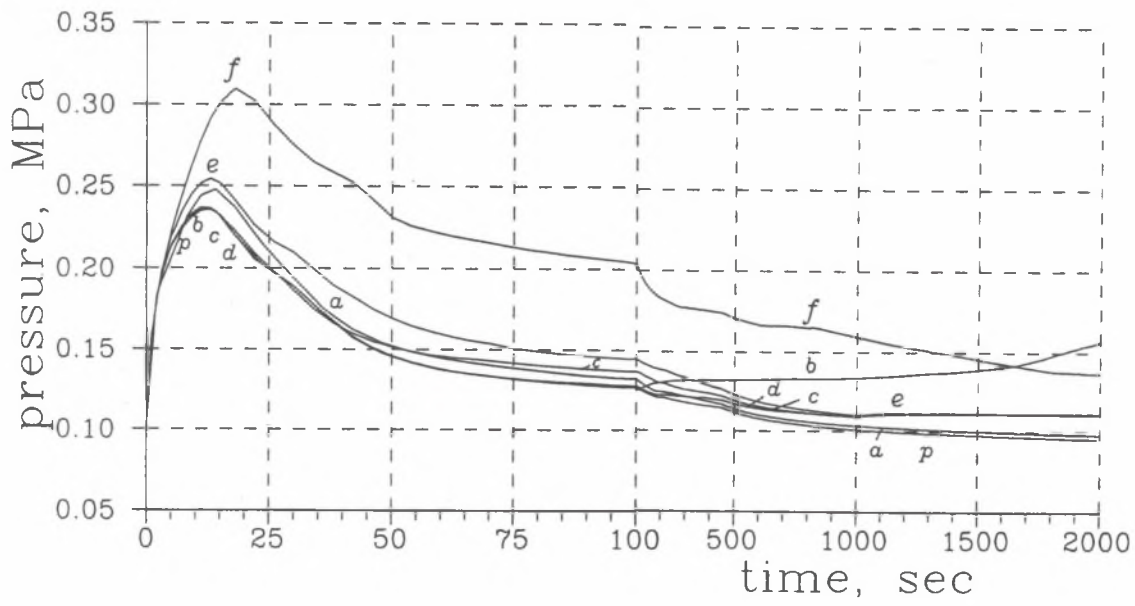
Wykonano obliczenia przyjmując następujące niesprawności w ULA:

- a) zablokowanie w pozycji zamkniętej dwóch zaworów zwrotnych pułapki powietrznej (łączyjących dwoma otworami o przekroju po 0.167 m^2 drugie i trzecie piętro półek wodnych z pułapką powietrzną),
- b) niezadziałanie czynnego systemu zraszania,
- c) otwarty właz pułapki powietrznej (łączyjący otworem o przekroju 1 m^2 dolną pułapkę z szybem WLA),
- d) niezamknięty przewód wentylacyjny $\varnothing 200 \text{ mm}$ łączący pułapkę powietrzną (dolną) z boksem wytwornic pary (strefa I),
- e) brak wody na trzech dolnych piętrach półek wodnych,
- f) brak wody na wszystkich półkach wodnych.

Obliczenia w wariancie a) wykonano przy zastosowaniu modelu dziesięciostrefowego, a w pozostałych przypadkach stosując model dziewięciostrefowy.

W wariancie b) zakładającym brak zraszania aktywnego przyjęto, że nie działa też aktywny układ awaryjnego chłodzenia rdzenia w wyniku zaniku wspólnego zasilania pomp tych układów. Dlatego założono, że przez cały rozpatrywany okres (po 30 s) rdzeń jest chłodzony w wyniku odparowywania wody (między innymi z biernego układu chłodzenia awaryjnego), a z obiegu wydostaje się para nasycona sucha. W pozostałych przypadkach przyjęto wpływ chłodziwa taki sam jak w wariancie podstawowym.

Na rys.5 pokazano przebiegi ciśnienia w strefie I dla wariantu podstawowego oraz dla wariantów a) + f). Wybrane charakterystyczne wartości dotyczące przebiegów ciśnienia w strefie I dla wszystkich rozpatrywanych wariantów zestawiono w tabelcy 1. Ciśnienie maksymalne w wariantach b) + d) różni się nieznacznie od ciśnienia maksymalnego w wariancie podstawowym, tzn. dla sprawnie działającego ULA. Podwyższone nieco ciśnienie maksymalne można zaobserwować w wariantach a), e), natomiast znacznie wyższe w wariancie f). Wystąpienie niesprawności przyjętej w wariancie f) jest jednak o wiele mniej prawdopodobne niż w wariantach pozostałych. Maksymalne ciśnienie występuje zwykle po około $12 + 13 \text{ s}$. Wyjątek stanowi wariant f), kiedy maksimum pojawia się po 18 sekundach. Czas obniżania ciśnienia do poziomu ciśnienia atmosferycznego jest, z wyjątkiem jedynie wariantu a), znacznie dłuższy niż w wariancie podstawowym (tabl.1., rys.5.).



Rys.5. Zmiany ciśnienia w strefie I dla rozpatrywanych wariantów p-UŁA działa sprawnie

Fig.5. Pressure distribution in zone I for considered variants p-containment system works correctly

Tablica 1

Cisnienie maksymalne p_{max} w strefie I ULA reaktora WWR-440 podczas LOCA, czas jego występowania τ_{max} oraz czas τ_{at} obniżania nadciśnienia do poziomu ciśnienia atmosferycznego

wariant wielkość	podst.	a	b	c	d	e	f
p_{max} , MPa	0.237	0.248	0.237	0.236	0.238	0.254	0.310
τ_{max} , s	11.8	11.8	12,5	11.5	12.5	13.0	18.0
τ_{at} , s	1110	-	1520	>2000	>2000	>2000	>2000

6. UWAGI KOŃCOWE

Opracowana metoda obliczeń parametrów termicznych w ULA podczas awarii typu LOCA oraz program obliczeniowy są skutecznym narzędziem wyznaczania tych parametrów.

Obliczenia wykonane dla ULA reaktora WWR-440 wykazują, że ciśnienie i temperatura w tym układzie podczas LOCA mieści się w granicach dopuszczalnych. Ciśnienie w pomieszczeniach reaktora i obiegu pierwotnego oraz w szybie WLA (z wyjątkiem pułapek powietrznych) spada szybko poniżej ciśnienia atmosferycznego. Wówczas niemożliwe staje się wydostawanie się do otoczenia izotopów radioaktywnych znajdujących się w ULA.

W przypadku wystąpienia najbardziej prawdopodobnych spośród rozpatrywanych niesprawności elementów ULA ciśnienie maksymalne również mieści się w granicach dopuszczalnych. Drastyczny wyjątek dotyczy bowiem bardzo mało prawdopodobnego wariantu f) zakładającego brak wody na wszystkich półkach wodnych. W wielu rozpatrywanych przypadkach znacznie wolniejsze jest natomiast obniżanie się ciśnienia do poziomu ciśnienia atmosferycznego.

LITERATURA

- [1] Waliser A.: An Overview of Reactor Containment Structures, Nuclear Eng. and Design, 61, 1980.
- [2] Strupczewski A.: Awaryjne reaktorowe a bezpieczeństwo energetyki jądrowej. WNT, Warszawa 1990.

- [3] Brosch E.D.: ZOCO V, A Computer Code for the Calculation of Time and Space Dependent Pressure Distribution In Reactor Containment. Nuclear Eng. and Design, 23, 1972.
- [4] 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 WWER oraz pełności-nieniowych obudowach bezpieczeństwa reaktorów PWR. IEA, Świerk 1987.
- [5] Fic A., Składzień J., Skorek J., Kulig M.: HEPMOD 1, A Computer Code for the Thermal - Hydraulic Analysis of WWER-440 Containment System: Nuclear Safety Analysis. Berlin 1989.
- [6] Wheel L.L., Wagner R.J., Niederauer G.F., Obenhain C.F.: CONTEMP-LT A Computer Program for Predicting Containment Pressure - Temperature Response to Loss - of - Coolant Accident. Idaho National Engineering Laboratory. ANCR - 1219, Idaho 1975.
- [7] Wojtkowiak J.: Metoda maksymalnej skuteczności termodynamicznej systemu zraszania obudowy bezpieczeństwa siłowni jądrowej. Materiały XIV Zjazdu Termodynamików. Kraków 1990.
- [8] Wallis G.B.: One - Dimensional Two - Phase Flow. Mc Graw Hill Book Company. 1969.
- [9] Składzień J., Fic A., Skorek J.: Opracowanie nowej wersji kodu HEPRO-II/PC przeznaczonego do obliczeń ciepłno-przepływowych układu lokalizacji awarii elektrowni jądrowej typu WWER-440. Praca badawcza nie publikowana wykonana w Instytucie Techniki Ciepłej, Gliwice 1989.
- [10] Kulig M., Klisińska M.: Analiza układu lokalizacji awarii EJ Żarnowiec w przypadku niesprawności jego elementów. Raport IEA, Świerk 1988.
- [11] Szczurek J.: Informacja własna. Świerk 1988.
- [12] Składzień J., Fic A., Skorek J.: Opracowanie zweryfikowanego kodu numerycznego HEPRO przeznaczonego do analiz bezpieczeństwa układu lokalizacji awarii elektrowni jądrowej typu WWER - 440, etap 2. Praca badawcza nie publikowana wykonana w Instytucie Techniki Ciepłej, Gliwice 1990.

Recenzent: Dr inż. Jan Szczurek

ANALYSIS OF TRANSIENT PRESSURE IN THE CONTAINMENT SYSTEM OF VVER-440 REACTOR DURING ACCIDENT

A b s t r a c t

To prevent releasing of radioactive products into environment during the most serious credible accident, e.g. Loss-of-Coolant Accident (LOCA), all the elements of the primary cooling circuit of nuclear reactors are located inside of the containment system. Containment is supplied with pressure suppression system to reduce the pressure within it even under atmospheric level. Active spray system, water condensers and passive spray system are used for pressure suppression in VVER-440 containment. Scheme of this containment is presented in the figure 1.

The worked out method of calculation of thermal parameters in containment during LOCA is described in the paper. Presented method can be applied for analyzing an accident in various types of containment.

One assumes in the model, that all internal area of containment is subdivided into several zones, which are joined in the given mode. Water (subcooled or saturated) and gas (air, condensing or superheated steam and hydrogen) can occur in the zone. The model takes into consideration two-phase flow between zones [8], the flow through the wetwell [4], functioning of the active and passive spray system [4], heat exchange between gas, water and containment walls [5]. Distribution of time dependent flow rate and specific enthalpy of coolant releasing from the primary circuit is assumed to be known.

In order to calculate thermal parameters of gas and water in the zones in the successive time steps the energy balance equations and other thermodynamic equations [1 + 5] are used. Particular from of these equations depends on the state of steam and water within considered zone. This nonlinear equations system with regard to unknown quantities (pressure, temperature etc.) is solved using Newton method [6 + 11].

Results of calculations of transient pressure and temperature in VVER-440 containment during LOCA are presented in the figures 3,4,5. Correct work containment system and break - down of some its elements (fig. 5) were analyzed.