ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: MECHANIKA z. 107 Nr kol. 1154

Adam Fic, Jan Składzień, Janusz Skorek
Instytut Techniki Cieplnej
Politechnika Śląska

OKREŚLENIE WPŁYWU ROZDROBNIENIA KROPEL WODY W UKŁADZIE ZRASZANIA NA PRZEBIEG PARAMETRÓW TERMICZNYCH W UKŁADZIE LOKALIZACJI AWARII REAKTORA JĄDROWEGO

Streszczenie. W pracy podano metodę obliczania sprawności zraszania η. Wyznaczono sprawność η dla kilku wartości średnic kropel wody i wysokości ich opadania. Przedstawiono rezultaty obliczeń zmian ciśnienia w układzie lokalizacji awarii (ULA) reaktora WWER-440 po rozszczelnieniu obiegu pierwotnego (awaria LOCA) dla różnych wartości sprawności η.

Резюме. В работе описан метод вычисления коэфицента полезного действия орошения. Определены η для нескольких диаметров капли воды и высоты их опадания, какие выступают в оболочке (ULA) реактора ВВЭР-440. Приведены результаты вычислений изменения давления в этой ULA после разрыва первого контура (авария LOCA) для этих получены величины η.

Summary. Method of calculation of spray efficiency η is described in the paper. Spray efficiency for various diameter of droplet and various high of falling of water droplets have been determined. Results of calculations of the pressure changes in containment of WWER-440 nuclear reactor during Loss - of - Coolant Accident (LOCA) as function of η are presented in the paper.

1. WSTĘP

Wszystkie elementy obiegu chłodzenia reaktora we współczesnych siłowniach jądrowych są umieszczone w tzw. obudowie bezpieczeństwa, nazywanej też układem lokalizacji awarii (ULA). Obudowa ta ma ściany o podwyższonej szczelności i wytrzymałości. Jej zadaniem jest zapobieganie przenikaniu do otoczenia promieniotwórczych izotopów, które podczas niektórych awarii mogą wydostawać się z obiegu chłodzenia reaktora. Najpoważniejszą taką awarią projektową jest awaria LOCA polegająca na ro-

zerwaniu rurociągu obiegu chłodzenia reaktora. Ściany obudowy powinny wytrzymać maksymalne ciśnienie, jakie może w nim wystąpić podczas tego typu awarii oraz ograniczać wówczas do minimum przenikanie do otoczenia zawartych w ULA radioaktywnych gazów (powietrze, para, wodór, gazowe produkty rozszczepienia) i aerozoli. Jednym ze sposobów zmniejszania tych uwolnień jest instalowanie w obudowach dodatkowych systemów służących do obniżania w nich ciśnienia awaryjnego.

Powszechnie stosowanym układem obniżania nadciśnienia jest układ zraszania (aktywnego). Układ ten czerpie zimną wodę ze specjalnych zbiorników lub studzienek i za pomocą dysz rozpyla pod sklepieniem pomieszczeń obiegu chłodzenia reaktora. Krople wody podczas swego opadania ochładzają gaz znajdujący się w zraszanym pomieszczeniu, co prowadzi do kondensacji pary i w efekcie do obniżenia ciśnienia. W niektórych ULA stosuje się też dodatkowo inne układy obniżania nadciśnienia, jak kondensatory lodowe, czy kondensatory wodne [1]. W blokach z reaktorami WWER-440 w skład obudowy wchodzi również tzw. wieża lokalizacji awarii (WLA). Wieża ta jest połączona z budynkiem reaktora i zawiera wypełnione wodą półki z zamknięciem syfonowym oddzielającym jej przestrzeń wlotową (szyb WLA) od tzw. pułapek powietrznych. W ten sposób gaz podczas awarii LOCA przedostaje się z budynku reaktora do WLA, gdzie podczas przepływu przez zamknięcie syfonowe wykrapla się para. Oprócz tego w pewnych fazach awarii ciśnienie na półkach staje się wyższe niż w szybie WLA [2]. Wówczas woda jest wysysana z półek wodnych do specjalnych zbieraczy wody, a następnie jest rozpylana przez otworki w dnach tych zbieraczy do szybu WLA. Następuje wtedy tzw. zraszanie bierne, prowadzące również do obniżenia nadciśnienia.

W stosowanych modelach zjawisk cieplno-przepływowych w ULA po rozszczelnieniu obiegu pierwotnego do określania ciepła przejmowanego przez opadające krople rozpylane przez układy zraszania wykorzystuje się powszechnie wielkość nazywaną sprawnością zraszania η. Sprawność ta jest stosunkiem ilości ciepła przejętego przez opadającą kroplę i ilości ciepła, którą kropla może przejąć maksymalnie, a zatem:

$$\eta = \frac{i_2 - i_1}{i_{2m} - i_1} \tag{1}$$

gdzie i_1, i_2, i_{2m} są entalpią właściwą kropli odpowiednio początkową, końcową i maksymalną końcową. Sprawność zraszania traktuje się zwykle jako daną we wskazanych wyżej obliczeniach. Określenie wartości η wymaga

specjalnych dodatkowych obliczeń.

Średnica kropel wody zraszającej atmosferę ULA ma naturalnie wpływ na sprawność zraszania. Oprócz tego sprawność ta zależy od wysokości opadania kropel wody, ich temperatury początkowej i składu gazu.

2. WYZNACZANIE SPRAWNOŚCI ZRASZANIA

Przy wykorzystaniu wzoru (1), wyznaczanie sprawności zraszania η sprowadza się do określenia przyrostu entalpii właściwej Δi_k opadającej kropli:

$$\Delta i_k = i_2 - i_1 \tag{2}$$

oraz maksymalnej końcowej entalpii właściwej kropli i_{2m}.

Entalpia właściwa i_{2m} zależy od parametrów gazu wypełniającego zraszaną przestrzeń. Zgodnie z [2] przyjęto, że temperatura gazu T_g jest niższa od temperatury nasycenia $T_n(p_{tot})$ odpowiadającej ciśnieniu całkowitemu p_{tot}. W ten sposób entalpia i_{2m} jest równa entalpii właściwej wody $i(T_g)$ o temperaturze równej temperaturze gazu T_g.

Problem wyznaczenia przyrostu entalpii właściwej kropli Δi_k rozwiązano przyjmując, że krople o znanej średnicy d_k opadają z zadanej wysokości H w ośrodku o znanym składzie i znanych parametrach termicznych (stałych w czasie ich opadania). Na powierzchni kropli zachodzi konwekcyjna wymiana ciepła, nie występuje zaś dyfuzyjny ruch masy.

Czas opadania kropli τ_H wynika z rozwiązania równania jej ruchu:

$$\frac{dw}{d\tau} = g - A\,w^2 \tag{3}$$

gdzie: w - pionowa składowa prędkości,

g - przyśpieszenie ziemskie,

A - współczynnik.

Przy stałej wartości współczynnika A i warunku początkowym $w(\tau=0)=w_1$, rozwiązanie tego równania ma postać [3]:

$$\tau_H = \frac{1}{2\sqrt{gA}} \ln \frac{(\sqrt{g} + w_2\sqrt{A})\,(\sqrt{g} - w_1\sqrt{A})}{(\sqrt{g} - w_2\sqrt{A})\,(\sqrt{g} + w_1\sqrt{A})} \tag{4}$$

gdzie prędkość końcowa

$$w_2 = \left(\frac{1}{A} \left[(A\,w_1^2 - g)\,e^{-2AH} + g \right] \right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

Przyrost entalpii właściwej kropli Δi_k w czasie jej opadania τ_H, przy

założeniu stałej wartości współczynnika wnikania ciepła α na powierzchni kropli, jest określony wzorem:

$$\Delta i_k = \frac{6\,\alpha}{d_k\,\rho_k} \int_0^{\tau_H} [T_g - T_p(\tau)]\, d\tau \tag{6}$$

gdzie: ρ_k - gęstość kropli,

$T_p(\tau)$ - temperatura powierzchni kropli.

Zmienną w czasie temperaturę T_p powierzchni kropli można wyznaczyć rozwiązując równanie przewodzenia ciepła w kropli ze stałym warunkiem brzegowym III rodzaju na jej powierzchni i wyrównaną temperaturą początkową kropli T . Rozwiązanie to ma postać:

$$T_p = T_g + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{\sin(\gamma_n R_k)}{R_k} e^{-a\,\gamma_n^2\,\tau} \tag{7}$$

gdzie: R_k - promień kropli,

a - współczynnik wyrównywania temperatury dla wody,

zaś wartości własne γ_n i współczynniki C_n wynikają z zależności:

$$tg(\gamma_n R_k) = \frac{\lambda\,\gamma_n R_k}{\lambda - \alpha R_k} \tag{8}$$

$$C_n = (T_g - T_1)\,\frac{4\,[\sin(\gamma_n R_k) - \gamma_n R_k \cos(\gamma_n R_k)]}{\gamma_n\,[2\,\gamma_n R_k - \sin(2\,\gamma_n R_k)]} \tag{9}$$

gdzie λ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła dla wody.

Wybrane rezultaty obliczeń sprawności zraszania podano w tablicy 1. W obliczeniach przyjęto wysokość opadania kropel H równą 10m i 25m (takie są wysokości opadania w układzie zraszania, odpowiednio aktywnego i biernego, w przypadku ULA reaktora WWER-400). W obliczeniach przyjęto stałe wartości współczynnika A wyznaczone na podstawie [3] oraz stałe wartości współczynnika α otrzymane przy zastosowaniu wzoru Fröslinga [4]. Założono początkową różnicę temperatury gazu i kropli $T_g - T_1$ równą 50K. Wstępne obliczenia wykazały, że sprawność zraszania praktycznie nie zależy od wartości tej różnicy. Przy rozpatrywanych wysokościach opadania kropel ($H \geq 10m$) nie ma też istotnego znaczenia prędkość początkowa kropel w_1. Dlatego przyjęto $w_1 = 0$.

Obliczenia wykazują, że dla kropel o średnicy mniejszej od 0,001m (jak dla układu zraszania aktywnego) sprawność η jest równa lub zbliżona do 1. Dla kropel o średnicy większej, przy średniej wysokości opadania kropel

Tablica 1

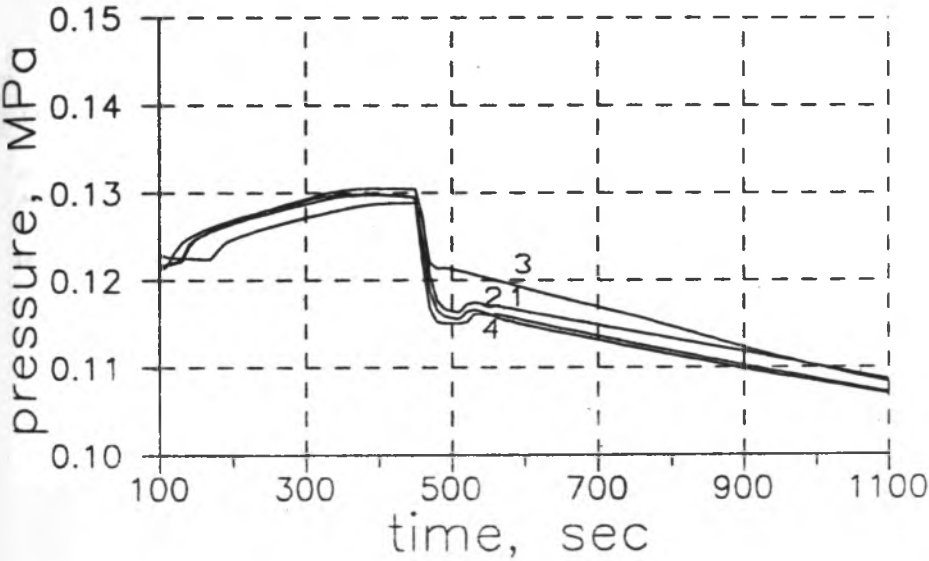
Sprawność zraszania η jako funkcja średnicy kropli d i wysokości opadania kropli H

d_k, m		0.0005	0.001	0.003	0.005
H,	10	1.	.99	.7	.45
m	25	1.	1.	.83	.59

25m (jak dla układu zraszania biernego), sprawność zraszania jest znacznie mniejsza od 1 i zależy od średnicy kropel.

3. WPŁYW SPRAWNOŚCI ZRASZANIA NA ZMIANY CIŚNIENIA W ULA

Za pomocą programu HEPCAL [2] wykonano obliczenia parametrów termicznych w ULA reaktora WWER-440 podczas LOCA. Obliczenia te wykonano dla



Rys. 1. Zmiany ciśnienia w boksach wytwornic pary reaktora WWER-440 podczas LOCA. 1-η_a=1; η_b=0,65; 2-0,9;0,65; 3-1;0,5; 4-1;0,8

Fig. 1. The changes of pressure in the steam generator rooms of the WWER-440 reactor during LOCA.
1-η =1; η =0,65; 2-0,9;0,65; 3-1;0,5; 4-1;0,8

sprawności zraszania w układzie aktywnym η_a = 1,0 i 0,9; a w układzie biernym η_b = 0,5; 0,65; 0,8. Prawdopodobieństwo wystąpienia sprawności zraszania spoza tego zakresu wydaje się niewielkie. Rezultaty obliczeń w postaci zmian ciśnienia w pomieszczeniach wytwornic pary pokazano na rys.1. Jak widać, zmiany wartości sprawności zraszania w podanym zakresie nie wpływają istotnie na rezultaty tych obliczeń.

4. UWAGI KOŃCOWE

Nie jest możliwe precyzyjne określenie sprawności zraszania, przede wszystkim ze względu na trudność dokładnego wyznaczenia rozkładu średnicy rozpylanych kropel. Rezultaty wykonanych obliczeń zmian ciśnienia w ULA reaktora WWER-440 podczas LOCA dla różnych wartości sprawności zraszania wskazują, że niedokładność jej wyznaczania nie ma istotnego wpływu na wyniki tych obliczeń.

LITERATURA

[1] Strupczewski A.: Awarie reaktorowe a bezpieczeństwo energetyki jądrowej. WNT, Warszawa 1990.

[2] Składzień J., Fic A., Skorek J.:Analiza numeryczna działania układu lokalizacji awarii elektrowni jadrowej Żarnowiec. Praca badawcza niepublikowana, Instytut Techniki Cieplnej, Gliwice 1990.

[3] Bierman Ł. D. i drugije: Tiepłopieriedacza ot parowozdusznoj smiesi k dispiergiriwannoj wodianoj strugie w ograniczennom objomie. Tiepłoenergetika 12, 1981.

[4] Staniszewski B.:Wymiana ciepła - podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1979.

DETERMINATION OF INFLUENCE OF WATER ATOMIZATION IN THE SPRAY SYSTEM ON CHANGES OF THERMAL PARAMETERS IN CONTAINMENT OF NUCLEAR REACTOR

All the elements of the primary cooling circuit of nuclear reactors are located inside of the containment system to prevent releasing of

radioactive products into environment during the most serious credible accident, e.g. Loss-of-Coolant Accident (LOCA). Containment is supplied by pressure suppression system to reduce the pressure within. Active spray system, water condensers and passive spray system are used for pressure suppression in WWER-440 containment.

Falling droplets of sprayed water cool down steam-air mixture. Heat transfer between water droplets and gas is characterized by so called spray efficiency η defined by (1). This coefficient depends among other things on diameter of water droplets. To evaluate spray efficiency η solution (4), (5) of droplet motion equation (3) and solution (7) of heat transfer equation in droplet have been used. Results of calculations of spray efficiency for data referring to the active (high of fall droplets H = 10m) and passive (H = 25m) spray system of WWER-440 containment are presented in the table 1. Spray efficiency gains maximum value $\eta=1$ for droplets diameter $d_k<0.001$m (active spray system). For droplets diameter $d_k>.001$ we have $\eta<1$ (passive spray system), dependent on diameter d_k.

Results of calculations of pressure changes during LOCA in the steam generator rooms of the WWER-440 containment, as a function of efficiency η, are presented in the figure 1.