ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1993
Seria: ENERGETYKA z.117 Nr kol.1207

Ryszard BIAŁECKI
Władysław ŁUKASZEK
Andrzej J. NOWAK

Politechnika Śląska

WYZNACZANIE POLA TEMPERATURY W UKŁADZIE OSŁONNYM REAKTORA JĄDROWEGO

Sreszczenie. W pracy wyznaczane jest dwuwymiarowe pole temperatury w układzie, który jest modelem części promieniowego (bocznego) układu osłonnego reaktora WWER-440, położonego na zewnątrz zbiornika ciśnieniowego, o wysokości równej wysokości rdzenia. Ze względu na znaczny promień zewnętrznej powierzchni zbiornika ciśnieniowego walcowy układ osłonny reaktora WWER-440 zastąpiony został w modelu układem płaskim.

DETERMINATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SHIELDING SYSTEM OF NUCLEAR REACTOR

Summary. Paper deals with a two-dimensional temperature distribution in a system which can be interpreted as a part of shielding system in the radial direction of VVER-440 reactor. This part is situated outside the pressure vessel and has an altitude equal to the altitude of reaction core. Taking into consideration sufficiently large external radius of a pressure vessel, the cylindrical shielding system of VVER-440 reactor is treated in the model as a plane shielding system.

DIE BESTIMMUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG IN ABSCHIRMUNGSSYSTEM DES KERNREAKTORS

Zusammenfassung. In dieser Arbeit wurden zweidimensionale Temperaturberechnungen durchgeführt, die eines Modells des Kernreaktorsabschirmungssystems betreffen. Man interpretiert das Modell als ein Teil des Abschirmungssystems des VVER-440 Kernreaktors. Der beschreibende Teil befindet sich äußerlich des Reaktordruckbehälters und die Höhe des Teils ist gleich der Höhe der Spaltzone. Mit Rücksicht auf große Radius des Reaktordruckbehälters, die zylindrische Geometrie des Abschirmungssystems des VVER-440 Kernreaktors wurde in Modell als Plattengeomeetrie angenommen.

1. WPROWADZENIE

Układ osłonny reaktora jądrowego jest układem o dużych rozmiarach, złożonej formie geometrycznej, skomplikowanej konstrukcji, niejednorodnym pod względem składu materiałowego. Analiza pól występujących w obszarze układu osłonnego (np. pola temperatury, mocy dawek, naprężeń termicznych) jest zada-

niem żmudnym o bardzo dużej trudności. W przypadku zastąpienia układu osłonnego konkretnego reaktora odpowiednim modelem zadanie numeryczne może być w pewnym stopniu uproszczone. Opisane w niniejszej pracy zadanie numeryczne dotyczy pola temperatury w modelu układu osłonnego reaktora energetycznego WWER-440.

Pole temperatury w układzie osłonnym reaktora jądrowego określają źródła ciepła wytworzone:

- na zewnątrz układu osłonnego (głównie w rdzeniu reaktora jądrowego),
- w materiałach układu osłonnego wskutek absorpcji promieniowania (głównie promieniowania gamma).

W układzie osłonnym występują równocześnie trzy rodzaje wymiany ciepła, a mianowicie:

- przewodzenie,
- konwekcja (naturalna i wymuszona),
- promieniowanie cieplne.

W artykule wyznaczane jest dwuwymiarowe pole temperatury w układzie, który jest modelem części promieniowego (bocznego) układu osłonnego reaktora WWER-440, położonego na zewnątrz zbiornika ciśnieniowego ($r > 1,92$ m), o wysokości równej wysokości rdzenia ($H = 2,5$ m). Ze względu na znaczny promień zewnętrznej powierzchni zbiornika ciśnieniowego walcowy układ osłonny reaktora WWER-440 zastąpiony został w modelu układem płaskim.

2. OPIS MODELU UKŁADU OSŁONNEGO

Szkic geometrii płaskiego modelu układu osłonnego reaktora WWER-440 łącznie z warunkami brzegowymi wymiany ciepła i z odpowiednimi informacjami jest pokazany na rys. 1.

Zakłada się, że powierzchnia zewnętrzna zbiornika ciśnieniowego oraz osłona termiczna są chłodzone konwekcyjnie (konwekcja naturalna) powietrzem. W konstrukcji osłony termicznej wyróżniono pakiet złożony z 21 folii stalowych (każda o grubości 1 mm) ustawionych w odległościach równych 4 mm. W szczelinie między osłoną termiczną i osłoną z betonu serpentynitowego (pierwsza szczelina) oraz w szczelinie między osłoną z betonu serpentynitowego i osłoną z betonu zwykłego (druga szczelina) uwzględnia się konwekcję wymuszoną powietrzem oraz zjawisko promienistej wymiany ciepła pomiędzy ściankami szczeliny.

Przyjmuje się grubość osłony z betonu serpentynitowego równą 70 cm, grubość osłony z betonu zwykłego równą 2,2 m oraz że wymiana ciepła z otoczeniem

z zewnętrznej powierzchni betonu zwykłego następuje wskutek konwekcji swobodnej i promieniowania.

Wpływ źródeł ciepła wytworzonych na zewnątrz modelu układu osłonnego uwzględnia się przez przyjęcie stałej temperatury zewnętrznej powierzchni zbiornika ciśnieniowego. Pozwala to pominąć w rozważaniach obszary rdzenia i osłony żelazo-wodnej. W celu określenia wpływu źródeł wytworzonych wskutek absorpcji promieniowania wykorzystuje się formułę (1) z pracy [1], dotyczącą rozkładu wydajności wewnętrznych źródeł ciepła w układzie osłonnym reaktora WWER-440 w stanie ustalonym

$$\dot{Q}_v(\chi) = 2398,78\exp(-5,909\chi), \tag{1}$$

gdzie:

$\dot{Q}_v(\chi)$ - wydajność wewnętrznych źródeł ciepła, W/m^3,

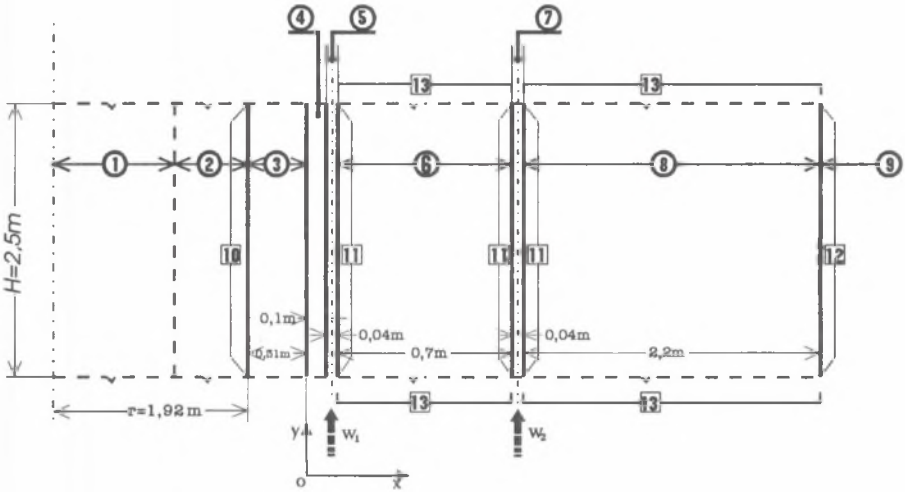
χ - odległość od wewnętrznej (od strony zbiornika ciśnieniowego) powierzchni osłony termicznej, m.

Przy wyznaczaniu zależności (1) uwzględniono:

- absorpcję promieniowania gamma emitowanego z rdzenia reaktora,
- absorpcję promieniowania gamma wytworzonego w materiałach układu osłonnego (promieniowanie wychwytowe i rozpadowe),
- absorpcję energii neutronów prędkich rozpraszanych sprężyście.

Założono ponadto, że moc cieplna reaktora WWER jest równa mocy nominalnej (1375MW) oraz że walcowy układ osłonny może być traktowany z dobrym przybliżeniem jako układ płaski.

Zgodnie z formułą (1) przyjęto rozkład wydajności wewnętrznych źródeł ciepła w obszarach 4,6 i 8 z rys.1. W osłonie termicznej (obszar 4) pominięto absorpcję promieniowania w szczelinach pomiędzy foliami stalowymi.



Rys. 1. Model bocznego układu osłonnego reaktora WWER-440

Fig. 1. The model of shielding system in the radial direction of the VVER-440 reactor

Oznaczenia:

1 - rdzeń reaktora,

2 - osłona żelazo-wodna,

3 - szczelina między ścianą zbiornika i osłoną termiczną,

4 - osłona termiczna,

5 - pierwsza szczelina, powietrze o stałej temperaturze dopływa z prędkością ω_1,

6 - osłona biologiczna, beton serpentynitowy, przewodzenie,

7 - druga szczelina, powietrze o stałej temperaturze dopływa z prędkością ω_2,

8 - osłona biologiczna, beton zwykły, przewodzenie,

9 - otoczenie, powietrze, stała temperatura otoczenia,

10 - stała temperatura zewnętrznej powierzchni zbiornika ciśnieniowego,

11 - promieniowanie z uwzględnieniem konwekcji wymuszonej ze współczynnikiem wnikania zależnym od temperatury,

12 - promieniowanie z uwzględnieniem konwekcji swobodnej ze współczynnikiem wnikania zależnym od temperatury,

13 - stała (równa zeru) gęstość strumienia ciepła.

3. WYMIANA CIEPŁA W OBSZARZE MIĘDZY ŚCIANĄ ZBIORNIKA CIŚNIENIOWEGO I ZEWNĘTRZNĄ POWIERZCHNIĄ OSŁONY TERMICZNEJ

Rozpatrywany obszar (rys.1) obejmuje szczelinę o grubości 0,31 m pomiędzy ścianą zbiornika ciśnieniowego i osłoną termicną utworzoną z 21 folii stalowych. Dwie sąsiednie folie stalowe ograniczają szczelinę osłony termicznej o grubości równej 0,004 m. Konwekcję swobodną uwzględnia się w obszarze przez ekwiwalentne przewodzenie ciepła z odpowiednio wyznaczonym efektywnym współczynnikiem przewodzenia. Dla szczeliny wypełnionej powietrzem, zgodnie z propozycją K.Schacka [2], można napisać

$$\lambda_{ef} = \lambda_{rz} A(T) D^{3/4} (\Delta T)^{1/4}, \tag{2}$$

gdzie:

λ_{ef} - efektywny współczynnik przewodzenia ciepła w szczelinie, W/(m·K),

λ_{rz} - rzeczywisty współczynnik przewodzenia ciepła dla powietrza, W/(m·K),

A(T) - funkcja temperatury dotycząca konwekcji swobodnej w powietrzu, $m^{-3/4} \cdot K^{-1/4}$,

D - grubość szczeliny, m,

ΔT - spadek temperatury w szczelinie, K.

Korzystając z prawa I. Fouriera otrzymuje się następujące wyrażenie na gęstość strumienia ciepła przekazywanego od ściany zbiornika ciśnieniowego do najbliższej (pierwszej) folii osłony termicznej

$$\dot{q}_0 = \bar{\lambda}_0 \bar{A}_0 D_0^{-1/4} (T_w - T_1)^{5/4} \tag{3}$$

gdzie:

$\dot{q}_0$ - gęstość strumienia ciepła, W/m^2,

$\bar{\lambda}_0 \bar{A}_0$ - wielkości λ_{rz} i A(T) wyznaczone dla średniej temperatury powietrza w szczelinie, W/(m·K), $m^{-3/4} \cdot K^{-1/4}$,

D_0 - grubość szczeliny między ścianą zbiornika ciśnieniowego i pierwszą folią osłony termicznej, m,

T_w - temperatura ściany zbiornika ciśnieniowego, K,

T_1 - temperatura pierwszej folii osłony termicznej,K.

Zakłada się, że w obszarze osłony termicznej spadek temperatury występuje wyłącznie w szczelinach (w warstwach powietrza), a temperatura wybranej folii jest stała. Gęstość strumienia ciepła w j-tej szczelinie osłony termicznej można zapisać wzorem podobnym do (3)

$$\dot{q}_0 + \sum_{i=1}^{j} \dot{q}_i = \bar{\lambda}_j \bar{A}_j d_s^{-1/4} (T_j - T_{j+1})^{5/4}, \qquad j = 1,2,\ldots,20 \tag{4}$$

gdzie:

$\dot{q}_0$ - gęstość strumienia ciepła określona wzorem (3), W/m^2,

$\sum_{i=1}^{j}$ - gęstość strumienia ciepła uwarunkowana przez źródła ciepła wytworzone wskutek absorpcji promieniowania jądrowego w foliach osłony termicznej od pierwszej do j-tej włącznie, W/m^2,

$\bar{\lambda}_j, \bar{A}_j$ - wielkości λ_{rz} i A(T) wyznaczone dla średniej temperatury powietrza w j-tej szczelinie osłony termicznej, $W/(m \cdot K)$, $m^{-3/4} \cdot K^{-1/4}$,

d_s - grubość szczeliny w osłonie termicznej, m,

T_j, T_{j+1} - temperatury lewej i prawej folii w j-tej szczelinie osłony termicznej, K.

Gęstość strumienia ciepła uwarunkowaną przez źródła ciepła wytworzone w i-tej folii określa się wg zależności

$$\dot{q}_i = \int_{(i-1)d}^{id} \dot{Q}_v(x)dx, \qquad i = 1,2,\ldots,21 \tag{5}$$

gdzie: d - oznacza grubość folii stalowej.

Z układu równań (3) i (4) można wyeliminować temperatury folii stalowych od pierwszej do dwudziestej włącznie. Wykonując odpowiednie przekształcenia i oznaczając $T_{21} = T_L$, otrzymuje się zależność

$$T_L = T_w - \left[\frac{\dot{q}_0}{\bar{\lambda}_0 \bar{A}_0} D_0^{1/4} \right]^{4/5} - \sum_{j=1}^{20} \left[\frac{\dot{q}_0 + \sum_{i=1}^{j} \dot{q}_i}{\bar{\lambda}_j \bar{A}_j} d_s^{1/4} \right]^{4/5}. \tag{6}$$

Temperatura 21 folii osłony termicznej jest temperaturą lewej ściany pierwszej szczeliny (szczeliny pomiędzy osłoną termiczną i osłoną biologiczną z betonu serpentynitowego).

Uwzględniając podział wzdłuż wysokości modelu na M komórek bilansowych zamiast równania (6) wykorzystuje się dla pierwszej szczeliny układ równań

$$T_{L,k} = T_w - \left[\frac{\dot{q}_0}{\bar{\lambda}_{0,k} \bar{A}_{0,k}} D_0^{1/4} \right]^{4/5} - \sum_{j=1}^{20} \left[\frac{\dot{q}_{0,k} + \sum_{l=1}^{j} \dot{q}_l}{\bar{\lambda}_{j,k} \bar{A}_{j,k}} d_s^{1/4} \right]^{4/5}, \qquad k = 1,\ldots,M \tag{7}$$

4. WYMIANA CIEPŁA W SZCZELINACH Z KONWEKCJĄ WYMUSZONĄ

Szczeliny, w których występuje konwekcja wymuszona, nazywane są umownie pierwszą i drugą szczeliną (rys. 1). W szczelinach tych uwzględnia się również wymianę ciepła przez promieniowanie między ścianami szczeliny.

Równanie bilansu dla gazu (powietrza chłodzącego) przy podziale szczeliny wzdłuż wysokości H na M komórek bilansowych mogą być zapisane w postaci

$$\omega \rho_0 c_p \Delta x (T_{g,k+1} - T_{g,k}) = \alpha_k \Delta y (T_{L,k} + T_{P,k} - T_{g,k} - T_{g,k+1}) \tag{8}$$

$$k = 1,\ldots,M$$

gdzie:

- k - numer bieżący komórki bilansowej,
- ω - prędkość gazu w przeliczeniu na warunki normalne, m/s,
- q_0 - gęstość gazu w przeliczeniu na warunki normalne, kg/m^3
- c_p - ciepło właściwe gazu przy stałym ciśnieniu, J/(kg·K),
- Δx - grubość szczeliny, m,
- $T_{g,k}$ - temperatura gazu dopływającego do k-tej komórki bilansowej, K,
- $T_{g,k+1}$ - temperatura gazu wypływającego z k-tej komórki bilansowej, K,
- α_k - współczynnik wnikania ciepła obliczony dla średniej temperatury gazu w k-tej komórce bilansowej, W/(m^2·K),
- Δy - wysokość komórki bilansowej, m,
  $\Delta_y = H/M$,
- $T_{L,k}$ - średnia temperatura lewej ściany k-tej komórki bilansowej, K,
- $T_{P,k}$ - średnia temperatura prawej ściany k-tej komórki bilansowej, K.

Zakłada się, że znana jest temperatura $T_{g,1}$ gazu dopływającego do pierwszej komórki bilansowej.

Układ równań (8) może być dostosowany dla pierwszej lub drugiej szczeliny przez wprowadzenie dodatkowego indeksu równego 1 lub 2.

Gęstości strumienia ciepła dla lewej i prawej ściany szczeliny mogą być zapisane w podobny sposób. W szczególności dla lewej ściany pierwszej szczeliny odpowiedni układ równań ma postać

$$\dot{q}_{L,k} = \alpha_k \left(T_{L,k} - \frac{T_{g,k} + T_{g,k+1}}{2} \right) + \varepsilon_{1-2,k} \sigma \left(T^4_{L,k} - T^4_{P,k} \right) \qquad (9)$$

$$k = 1, \ldots, M$$

gdzie:

$\dot{q}_{L,k}$ - gęstość strumienia ciepła doprowadzonego do ściany lewej w k-tej komórce bilansowej z podobszaru układu osłonnego położonego na lewo od pierwszej szczeliny, W/m^2,

$$\dot{q}_{L,k} = \dot{q}_{0,k} + \sum_{j=1}^{20} \dot{q}_i, \quad \text{(v.pkt.3)},$$

α_k - współczynnik wnikania ciepła obliczony dla średniej temperatury gazu w k-tej komórce bilansowej, $W/(m^2 \cdot K)$,

$T_{L,k}$ - średnia temperatura średniej ściany k-tej komórki bilansowej, K,

$T_{g,k}$ - temperatura gazu dopływającego do k-tej komórki bilansowej, K,

$T_{g,k+1}$ - temperatura gazu wypływającego z k-tej komórki bilansowej, K,

$\varepsilon_{1-2,k}$ - współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła między ściankami k-tej komórki bilansowej,

$$\varepsilon_{1-2,k} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{L,k}} + \frac{1}{\varepsilon_{P,k}} - 1},$$

$\varepsilon_{L,k}$, $\varepsilon_{P,k}$ - emisyjność lewej i prawej ściany k-tej komórki bilansowej,

σ - stała Stefana - Boltzmana,

$\sigma = 5{,}667 \cdot 10^{-8}\ W/(m^2 \cdot K)$,

$T_{P,k}$ - średnia temperatura prawej ściany k-tej komórki bilansowej, K.

Dla prawej ściany pierwszej szczeliny można napisać

$$\dot{q}_{P,k} = \alpha_k \left(\frac{T_{g,k} + T_{g,k+1}}{2} - T_{P,k} \right) + \varepsilon_{1-2,k} \sigma \left(T^4_{L,k} - T^4_{P,k} \right) \qquad (10)$$

$$k = 1, \ldots, M$$

gdzie: $\dot{q}_{P,k}$ - gęstość strumienia ciepła dopływającego do prawej ściany k-tej komórki bilansowej.

Dla drugiej szczeliny otrzymuje się układy równań na gęstości wpływających strumieni ciepła:

- dla lewej ściany

$$\dot{q}_{L,k} = \alpha_k \left(\frac{T_{g,k} + T_{g,k+1}}{2} - T_{L,k} \right) + \varepsilon_{1-2,k} \sigma \left(T^4_{P,k} - T^4_{L,k} \right) \qquad (11)$$

$$k = 1,\ldots,M$$

- dla prawej ściany

$$\dot{q}_{P,k} = \alpha_k \left(\frac{T_{g,k} + T_{g,k+1}}{2} - T_{P,k} \right) + \varepsilon_{1-2,k} \sigma \left(T^4_{L,k} - T^4_{P,k} \right) \qquad (12)$$

$$k = 1,\ldots,M$$

Znaczenia odpowiednich symboli zastosowanych w zależnościach (9),(10) oraz (11),(12) są identyczne. W równaniach (9)-(12) pomija się wpływ promieniowania pomiędzy ścianami nie należącymi do tej samej komórki.

Współczynnik wnikania ciepła występujący w formułach (8)-(12) oblicza się wg zależności podanej przez K.Schacka [2]

$$\alpha_k = \varphi\left(\frac{T_{g,k} + T_{g,k+1}}{2} \right) \omega^{3/4} \, (2\Delta x)^{-1/4} \qquad (13)$$

gdzie dla powietrza

$$\varphi(T) = 4,13 + 0,195 \, \frac{T - 273}{100} \, .$$

5. PRZEWODZENIE CIEPŁA W WARSTWACH BETONU SERPENTYNITOWEGO I ZWYKŁEGO

Przy rozwiązywaniu zadania przewodzenia ciepła w betonie serpentynitowym i zwykłym zostały przyjęte następujące założenia:

- pole temperatury jest płaskie, ustalone,
- wydajność wewnętrznych objętościowych źródeł ciepła opisuje równanie (1),
- współczynniki przewodzenia ciepła w zależności od temperatury aproksymowano łamaną.

Dla przyjętych założeń równanie przewodzenia ciepła ma postać

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \dot{Q}_v(x) = 0. \qquad (14)$$

W wyniku zastosowania metody elementów skończonych dyskretyzacja równania (14) w obszarze betonu serpentynitowego lub zwykłego prowadzi do równania macierzowego

$$\mathbf{A}(\mathbf{T}) \cdot \mathbf{T} = \mathbf{f}(\mathbf{T}), \tag{15}$$

gdzie:

$\mathbf{A}(\mathbf{T})$ - macierz kwadratowa przewodności cieplnych,

$\mathbf{T}$ - macierz kolumnowa temperatur w węzłach,

$\mathbf{f}(\mathbf{T})$ - macierz kolumnowa wyrazów wolnych.

Elemety macierzy $\mathbf{A}$ i $\mathbf{f}$ uwzględniają warunki brzegowe. Na ścianach ograniczających obszary betonów (rys. 1) zostały przyjęte następujące warunki brzegowe:

a) Zerowa wartość gęstości strumienia ciepła na ścianach ograniczających poziomych.

b) Promieniowanie z uwzględnieniem konwekcji wymuszonej ze współczynnikiem wnikania zależnym od temperatury w pierwszej i drugiej szczelinie. Odpowiednie warunki brzegowe określają zależności (10) i (11) dla betonu serpentynitowego oraz zależność (12) dla betonu zwykłego,

c) Promieniowanie z uwzględnieniem konwekcji swobodnej ze współczynnikiem wnikania zależnym od temperatury na ścianie betonu zwykłego kontaktującej się z otoczeniem. Odpowiedni warunek brzegowy określa układ równań (16)

$$\dot{q}_{L,k} = \alpha_k (T_{ot} - T_{L,k}) + \varepsilon_{1-2,k} \sigma (T_{ot}^4 - T_{L,k}^4) \tag{16}$$

$$k = 1, \ldots, M$$

gdzie: $\dot{q}_{L,k}$ - gęstość strumienia ciepła dopływającego do ściany betonu zwykłego kontaktującej się z otoczeniem w k-tej komórce bilansowej, W/m^2,

α_k - współczynnik wnikania ciepła obliczony dla średniej temperatury ściany betonu zwykłego w k-tej komórce bilansowej, $W/(m^2 \cdot K)$,

T_{ot} - temperatura otoczenia, K,

$T_{L,k}$ - średnia temperatura lewej ściany k-tej komórki bilansowej, K,

$\varepsilon_{1-2,k}$ - współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła ściany k-tej komórki bilansowej z otoczeniem,

σ - stała Stefana-Boltzmana, $W/(m^2 \cdot K)$.

Współczynnik wnikania ciepła w zależności (16) oblicza się wg M. Michiejewa [2] za pomocą wzorów:

a) jeżeli $Gr \cdot Pr = 5 \cdot 10^2 \div 10^7$

$$\alpha_k = A_1(T_{L,k}) \left[\frac{T_{L,k} - T_{ot}}{H_{ef}} \right]^{1/4}, \tag{17}$$

b) jeżeli $Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$

$$\alpha_k = A_2(T_{L,k})(T_{L,k} - T_{ot})^{1/3} \tag{18}$$

Symbole zastosowane we wzorach (17) i (18) oznaczają:

$A_1(T)$, $A_2(T)$ - znane funkcje temperatury,

Gr, Pr - liczby kryterialne, odpowiednio Grashoffa i Prandtla,

H_{ef} - przyjęta wysokość efektywna ściany betonu zwykłego, m.

Pozostałe symbole zastosowane we wzorach (17) i (18) mają znaczenie podane w przypadku wzoru (16).

6. PRZEBIEG ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIENIA. PROGRAMY KOMPUTEROWE

Temperatury w węzłach siatki numerycznej modelu układu osłonnego wyznaczane są metodą iteracji przy wykorzystaniu układów równań z rozdziałów 3,4 i 5. W każdej iteracji można wyróżnić 3 etapy:

1. etap dotyczy obliczeń szczelin z konwekcją wymuszoną opisanych za pomocą układów równań (7), (8) i (9),
2. etap dotyczący obliczeń przewodzenia ciepła w betonie serpentynitowym opisanych za pomocą układów równań (10), (11) i (15),
3. etap dotyczący obliczeń przewodzenia ciepła w betonie zwykłym opisanych za pomocą układów równań (12), (15) i (16).

Ścisły opis procesu iteracyjnego wymaga zastosowania wielkości z indeksami trójelementowymi. Pierwszy element przyjmuje wartości:

1 - dla pierwszej szczeliny,

2 - dla drugiej szczeliny,

3 - dla powierzchni granicznej beton zwykły - otoczenie.

Symbole z indeksami trójelementowymi po opuszczeniu pierwszego elementu przyjmują znaczenie zgodne z odpowiednimi symbolami z indeksami dwuelemtowymi zastosowanymi w rozdziałach 3,4 i 5 pracy.

W iteracji zerowej przyjmuje się wartości

$$\dot{q}^{(0)}_{0,k},\ T^{(0)}_{1,L,k},\ T^{(0)}_{1,g,k},\ T^{(0)}_{1,P,k},\ T^{(0)}_{2,L,k},\ T^{(0)}_{2,g,k},\ T^{(0)}_{2,P,k},\ T^{(0)}_{3,L,k},$$

oraz zakłada się równe temperatury wszystkich węzłów w betonie serpentynitowym i betonie zwykłym, co oznacza

$$T^{(0)}_{1,P,k} = T^{(0)}_{2,L,k} \quad \text{oraz} \quad T^{(0)}_{2,P,k} = T^{(0)}_{3,L,k} .$$

W pierwszej kolejności (etap 1) z układów (7) i (9) wyznacza się

$$\dot{q}^{(1)}_{0,k} , \; T^{(1)}_{1,L,k}$$

metodą Newtona-Raphsona.

W etapie drugim obliczane są wartości $\dot{q}^{(0)}_{1,P,k}$ z układu (10) oraz $\dot{q}^{(0)}_{2,P,k}$ z układu (11), a następnie przechodzi się do rozwiązania układu (15), z którego wyznacza się

$$T^{(1)}_{1,P,k} \text{ i } T^{(1)}_{2,L,k}$$

Wartości $T^{(1)}_{1,g,k}$ mogą być obliczone z układu (8).

W etapie 3 obliczane są wartości $\dot{q}^{(0)}_{2,P,k}$ z układu (12) oraz $\dot{q}^{(0)}_{3,L,k}$ z układu (16). Z rozwiązania układu (15) dla betonu zwykłego wyznacza się wartości

$$T^{(1)}_{2,P,k} \quad \text{oraz} \quad T^{(1)}_{3,L,k}$$

Obliczeniem wartości $T^{(1)}_{2,g,k}$ z układu (8) zostaje zakończony proces wyznaczania wartości dla pierwszej iteracji.

Układ (15) dla betonu serpentynitowego (etap 2) i dla betonu zwykłego (etap 3) rozwiązywany jest metodą Newtona-Raphsona z przybliżonym obliczaniem jakobianu.

Proces iteracyjny zostaje zakończony, jeżeli dla m-tej i (m+1) iteracji spełnione są warunki:

- w przypadku temperatur wyznaczanych w betonie serpentynitowym lub zwykłym

$$\frac{\sum (T^{(m)} - T^{(m+1)})^2}{\sum (T^{(m+1)})^2} < \varepsilon_1 , \tag{19}$$

- w przypadku pozostałych temperatur

$$|T^{(m)} - T^{(m+1)}| < \varepsilon_2 , \tag{20}$$

Sumowanie w liczniku i mianowniku wyrażenia (19) jest rozciągnięte na temperatury wszystkich węzłów w betonie serpentynitowym lub zwykłym.

Kompletny cykl obliczeń iteracyjnych został zaprogramowany w postaci pliku BATCH. W pliku są wywoływane:

1 - program do obliczeń temperatur w osłonie termicznej oraz w pierwszej i drugiej szczelinie,

2 - program do obliczeń metodą elementów skończonych pola temperatury w warstwach betonu serpentynitowego i zwykłego.

Program pierwszy napisany specjalnie dla rozwiązania omawianego zagadnienia liczby ok. 200 wierszy. Program drugi jest to w zasadzie program TERMES [3] wywoływany dla różnych zestawów danych, w którym dokonano dodatkowych rozszerzeń dotyczących m.in. biblioteki warunków brzegowych, biblioteki źródeł ciepła i wykorzystywanych makroinstrukcji.

Kolejno wywoływane programy komunikują się wzajemnie przez wytwarzane pliki danych i wyników. Obliczenia odbywają się w pętli. Decyzję o zakończeniu obliczeń podejmuje użytkownik, ustalając wartości ε_1 i ε_2 występujące w wyrażeniach (19) i (20), na podstawie komunikatów o osiągniętej zbieżności, wysyłanych przez pierwszy program na ekran monitora.

7. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ I UWAGI KOŃCOWE

Opisane w artykule zadanie transportu ciepła w modelu układu osłonnego reaktora WWER-440 może być rozwiązywane dla różnych zestawów danych. Obliczenia przykładowe wykonano dla wariantu danych, w którym przyjęto m.in. następujące wartości:

- temperatura zewnętrznej ściany zbiornika ciśnieniowego	275^0C
- grubość osłony termicznej	0,1 m
- liczba folii stalowych w osłonie termicznej	21
- grubość folii stalowej	0,001 m
- liczba warstw powietrza w obszarze osłony termicznej	20
- grubość warstwy powietrza w obszarze osłony termicznej	0,004 m
- grubość pierwszej i drugiej szczeliny	0,04 m
- temperatura powietrza na wlocie	
do pierwszej szczeliny	50^0C
do drugiej szczeliny	30^0C
- prędkość (powietrza w warunkach normalnych) dopływającego	
do pierwszej i drugiej szczeliny	2 m/s
- współczynnik wymiany radiacyjnej	
w pierwszej szczelinie	0,8
w drugiej szczelinie	0,9

dla ściany z betonu zwykłego i otoczenia 0,9

- temperatura otoczenia $20^{o}C$
- wysokość efektywna ściany z betonu zwykłego kontaktującej się z otoczeniem (istotna przy obliczaniu współczynnika wnikania ciepła) 5 m.

Współczynniki przewodzenia ciepła dla betonów przyjęte zostały w przedziale $0^{o}C \le t \le 100^{o}C$ jako liniowe funkcje temperatury, a mianowicie:

- dla betonu serpentynitowego

$$\lambda(t) = -7{,}0 \cdot 10^{-3} t + 2{,}5$$

- dla betonu zwykłego

$$\lambda(t) = -2{,}0 \cdot 10^{-3} t + 1{,}5$$

gdzie $\lambda(t)$ wyrażona jest w $W/(m \cdot K)$.

W formułach dla szacowania błędu (19) i (20) założono

$$\varepsilon_1 = 0{,}01, \quad \varepsilon_2 = 0{,}0001.$$

W każdej szczelinie z konwekcją wymuszoną przyjęto 19 komórek bilansowych o wymiarach (0,04x0,0,1361) m, co warunkuje 20 węzłów numerycznych na pionowej ścianie (wzdłuż wysokości) szczeliny.

W obszarach betonu serpentynitowego i zwykłego przyjęto podział na 10x19=190 elementów prostokątnych z liczbą węzłów 11x20=220. Wymiary elementów wynoszą:

- w obszarze betonu serpentynitowego (0,07x0,1316)m
- w obszarze betonu zwykłego (0,22x0,1316)m.

Wymiar 0,1316 m odpowiada wysokości elementu mierzonej wzdłuż osi y.

Macierz **A**(T) z równania mierzonego (15), niezależnie od wyboru obszaru (beton serpentynitowy lub zwykły), zawiera 220x220 elementów.

Izotermy pola temperatury dla podanego przykładowego zestawu danych mają postać zbliżoną do prostopadłych względem osi x. Zmiany temperatury wzdłuż wysokości układu osłonnego są niewielkie. Otrzymane z obliczeń wybrane wartości temperatury w stopniach Celsjusza, zestawione w dwóch kolumnach dla wysokości układu osłonnego 0,0 m i 2,5 m są podane niżej:

a) w piewszej szczelinie

- na ścianie lewej (21 folia osłony termicznej)	58,05	65,12
- powietrza chłodzącego	50,00	(57,33)
- na ścianie prawej (ściana betonu serpentynitowego)	61,86	68,07

b) w drugiej szczelinie

- na ścianie prawej (ściana betonu serpentynitowego)	38,08	41,55
- powietrza chłodzącego	30,00	(33,80)
- na ścianie prawej (ściana betonu zwykłego)	32,37	35,70
c) na ścianie betonu zwykłego kontaktującej się z otoczeniem	21,40	21,47

Temperatury w kolumnie drugiej podane w nawiasach oznaczają średnie temperatury powietrza chłodzącego dla najwyższej, tj. 19 komórki bilansowej. Pozostałe temperatury w kolumnach pierwszej i drugiej oznaczają temperatury węzłowe.

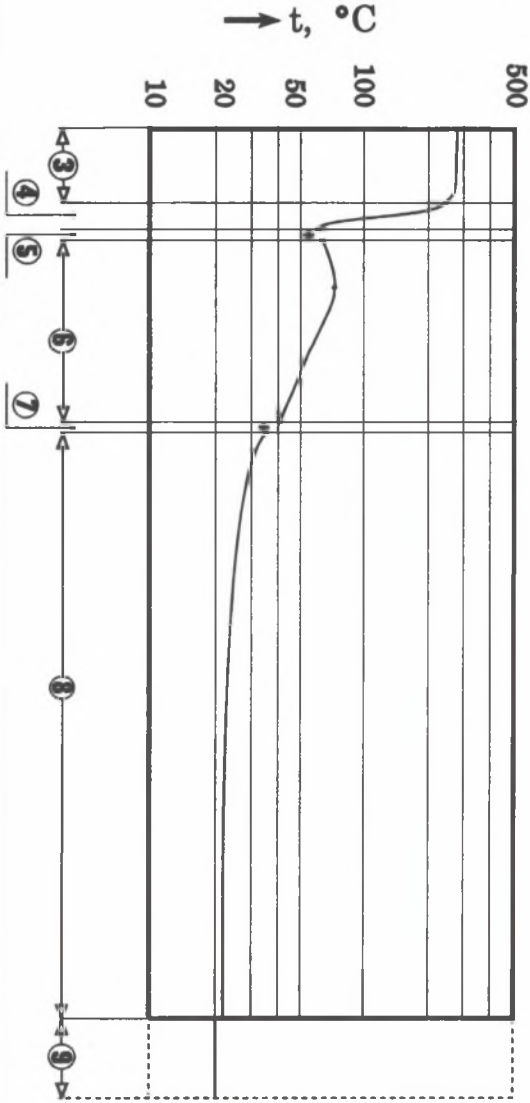
Poziome rozkłady temperatury dla różnych wysokości y mają zbliżone postacie. Na rys.2. pokazany jest poziomy rozkład temperatury odpowiadający y = 1,3158 m, tj. w przybliżeniu połowie wysokości rozpatrywanego modelu układu osłonnego. Rozkład wykazuje w betonie serpentynitowym ekstremum lokalne z najwyższą obliczoną temperaturą 70,89^{0}C w odległości 0,14 m od prawej ściany pierwszej szczeliny. Maksymalna otrzymana z obliczeń temperatura w betonie serpentynitowym jest równa 73,34^{0}C i odpowiada y = 2,5 m.

Efektywność rozpatrywanego modelu układu osłonnego reaktora WWER-440 ze względu na nagrzanie może być zweryfikowana przez porównanie wyników obliczeń z odpowiednimi danymi literaturowymi.

Nagrzanie betonu żaroodpornego (serpentynitowego), w którym został zastosowany cement portlandzki, do temperatur 500-600^{0}C wywołuje nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości i modułu sprężystości [4]. W temperaturach do 450^{0}C beton serpentynitowy zachowuje wystarczającą ilość wody i wykazuje bardzo dobre właściwości osłonne [5]. W betonie zwykłym ubytki wody związanej chemicznie z hydratacją cementu obserwuje się przy temperaturach nieco przekraczających 100^{0}C, natomiast woda krystaliczna jest usuwana przy temperaturach ok. 200^{0}C [4]. Wg H.S. Davisa stałe działanie temperatury w granicach do 93^{0}C wprowadza nieznaczne pogorszenie wytrzymałości betonów zwykłych [6].

W betonie zbrojonym lub w betonie z zabudowanymi elementami konstrukcyjnymi zachodzą dodatkowe zjawiska fizyczne zmieniające przyczepność betonu do armatury. Przy założeniu:

- ekonomicznie uzasadnionych udziałów armatury (180-360 kg/m^3),
- zależności parametrów (betonu i armatury) od temperatury,
- wystąpienia plastycznych deformacji betonu i rozwinięcia się rys o rozmiarach nie podważających właściwości osłonnych,



Rys. 2. Poziomy rozkład temperatury w modelu bocznego układu osłonnego reaktora WWER-440 odpowiadający y=1,3158m. Oznaczenia obszarów wzdłuż osi są zgodne z przyjętymi na rys. 1. Symbolem + oznaczono temperatury powietrza chłodzącego w pierwszej i drugiej szczelinie

Fig. 2. Horizontal temperature distribution, at y=1.3158m, along the radial direction of the VVER-440 reactor shielding system. The designation of regions is consistent with designations used in Fig. 1. Punctuation mark + indicates the temperatures of air in the first and second gap

określone zostały dla zwykłych betonów zbrojonych dopuszczalne różnice temperatur (między wewnętrzną i zewnętrzną powierzchnią pobocznicy osłony walcowej o grubości 1 m i promieniu wewnetrznym 3 m) w granicach od 154 do 237°C [7].

Wykorzystany w ramach niniejszej pracy zestaw programów komputerowych może być stosowany do wielowariantowych obliczeń układów osłonnych reaktorów jądrowych. Pozwala to również optymalizować układy osłonne. Przy odpowiednim doborze makroinstrukcji możliwa będzie również analiza stanów nieustalonych, występujących np. podczas rozruchu lub w przypadku awarii.

LITERATURA

[1] Łukaszek W.: Wyznaczanie rozkładów wydajności wewnętrznych źródeł ciepła w układzie osłonnym reaktora jądrowego generowanych w wyniku oddziaływań promieniowania gamma i neutronów, Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej NB-400/RAu-2/RME-3/88/4.1 RPBR-RR-I-14, etap II, ITC, Gliwice 1990.

[2] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki, Wyd.4, WNT, Warszawa 1986.

[3] Białecki R, Fic A., Łukaszek W., Nowak A.J., Szargut J.: Doskonalenie metod numerycznych i programów komputerowych obliczania pól temperatury w elementach reaktora jądrowego, Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej realizowanej w ramach CPBP 02.18, zadanie badawcze 4.4.2.3. ITC, Gliwice 1986 - 1990.

[4] Brodier D.L. i inni: Beton jako materiał osłon urządzeń jądrowych, (tłum. z jęz.ros.). Biblioteka Postępów Techniki Jądrowej, Publikacja nr 393, Warszawa 1968.

[5] Ablewicz Z., Dubrowski W.B: Osłony przed promieniowaniem jonizującym, Arkady, Warszawa 1986.

[6] Komorowskij A.N.: Stroitielstwo jadiernych ustanowok, Wyd.2, Atomizdat, Moskwa 1965.

[7] Pergamenszczik B.K. i inni: Rasczot biologiczeskoj zaszczity jadernowo reaktora na temperaturnyje nagruzki, Woprosy fiziki reaktorow, Zeszyt 3, Gosatomizdat, Moskwa 1969, s.234-245.

Recenzent: Prof.Pol.Śl. Dr hab.inż. Jan Składzień

DETERMINATION OD TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SHIELDING SYSTEM OF NUCLEAR REACTOR

A b s t r a c t

Two-dimensional temperature distribution is determined in the plane model of shielding system of nuclear reactor. A part of shielding system in the radial direction of the VVER-440 reactor is considered as an example. This part is situated outside the pressure vessel. The following regions in the radial direction are selected:

- gap between the wall of a pressure vessel and thermal shield,
- thermal shield (a set of steel sheets and air slots),
- firs gap (air gap),
- biological shield (serpentine concrete),
- second gap (air gap),
- biological shield (ordinary concrete),
- environment (air).

The altitude of the model is assumend to be equal to altitude of the VVER-440 reactor core. The following assumptions are made:

- the external surface of pressure vessel and thermal shield are cooled by air (natural convection),
- heat radiation and forced convection (heat transfer coefficient varying with temperature) in the first and second gap,
- heat conduction (thermal conductivity varying with temperature - linear approximation) in the regions of serpentine and ordinary concretes,
- heat radiation and natural convection on the external surface of ordinary concrete (having contact with environment).

The assumption of constant temperature on the external surface of pressure vessel permits to ignore the influence of heat sources located in reactor core and in iron-water shield. To account for the heat sources generated due to an absorption of nuclear radiation, the distribution of heat source generation rate from paper [1] has been utilized.

Two computer programs have been used for numerical computations:

- program for solution of temperature field in the first and second gap,
- program for determination of temperature distribution (by means of finite elements method) in regions of serpentine and ordinary concretes.

Iterative process is completed once convergence criterion (based on relative error) is satisfied.

The instance calculations have been performed for typical set of input data. The isotherms in concretes generally have a from of straight lines perpendicular to radial direction. The radial distributions of temperature show a local maximum in the region of serpentine cocrete. The maximal computed temperature in the region of serpentine concrete is equal to 73.34^{o}C. It is in good agreement with the information accessible from professional literature [5], that in the range of temperature to 450°C, the serpentine concrete contains a sufficient amount of water and possesses very good shielding properties.