

## ANALIZA NUMERYCZNA WYMIANY CIEPŁA W PRĘCIE PALIWOWYM REAKTORA „MARIA” W STANACH POWYŁĄCZENIOWYCH

ADAM FIC, JAN SKŁADZIEN

*Institut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska  
e-mail: adam.fic@polsl.pl*

**Streszczenie.** W wyniku istnienia mocy powyłączeniowej elementy paliwowe reaktora jądrowego muszą być chłodzone także po jego wyłączeniu. Jak wykazują pomiary, po upływie pewnego czasu od chwili wyłączenia reaktora doświadczalnego „Maria” można wyłączyć pompy cyrkulacyjne. Dostatecznie intensywny odbiór ciepła od paliwa gwarantuje powstająca wówczas cyrkulacja naturalna chłodziwa w kanale paliwowym. W pracy przedyskutowano wyniki obliczeń numerycznych pola temperatury i prędkości chłodziwa wewnątrz prętów paliwowych reaktora „Maria” po wyłączeniu reaktora i powstaniu tam cyrkulacji naturalnej chłodziwa. Obliczenia wykonano za pomocą pakietu CFD Fluent.

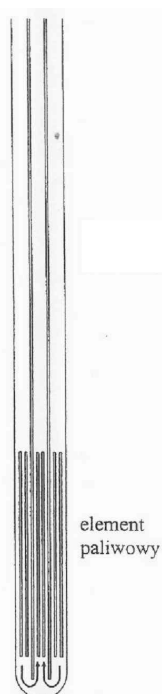
### 1. WPROWADZENIE I CEL PRACY

Jednym z podstawowych warunków bezpiecznej eksploatacji reaktorów jądrowych jest zapewnienie niezawodnego odbioru ciepła generowanego w paliwie podczas pracy reaktora i po jego wyłączeniu. Problem ten dotyczy zarówno reaktorów energetycznych, jak i reaktorów badawczych o stosunkowo niewielkiej mocy, przy czym wbrew pozorom znaczenie szczególne ma chłodzenie reaktora po jego wyłączeniu. Podczas pracy reaktora odpowiednio intensywne chłodzenie paliwa zapewniają pompy cyrkulacyjne tłoczące chłodziwo przez kanały paliwowe, po wyłączeniu reaktora natomiast pompy te często nie pracują. Równocześnie w paliwie generowane jest ciepło w wyniku egzotermicznych reakcji rozpadu produktów rozszczepienia i wtórnych reakcji wywoływanych przez cząstki emitowane podczas wspomnianych rozpadów. Bezpośrednio po wyłączeniu reaktora moc cieplna powyłączeniowa  $N_{Q_w}$  stanowi około 7% [1] mocy cieplnej  $N_{Q_0}$  przed jego wyłączeniem, a następnie moc ta wolno spada i po 0.5 h stanowi około 1.5%, po 5 h około 1 %, zaś po 5 dobach około 0.5% mocy  $N_{Q_0}$ . Intensywność generacji tego ciepła jest więc często na tyle duża, że w przypadku niedostatecznego chłodzenia prętów paliwowych może ona doprowadzić do nadmiernego wzrostu temperatury w tych prętach po wyłączeniu reaktora i do rozszczepienia koszulek paliwowych, a w skrajnych przypadkach nawet do stopienia paliwa. Dlatego niezbędnym elementem analiz bezpieczeństwa każdego reaktora jądrowego są symulacje pól temperatury w rdzeniu reaktora nie tylko podczas normalnej pracy, ale również po jego wyłączeniu. Dotyczy to także reaktorów badawczych, jak reaktor MARIA w Świerku.

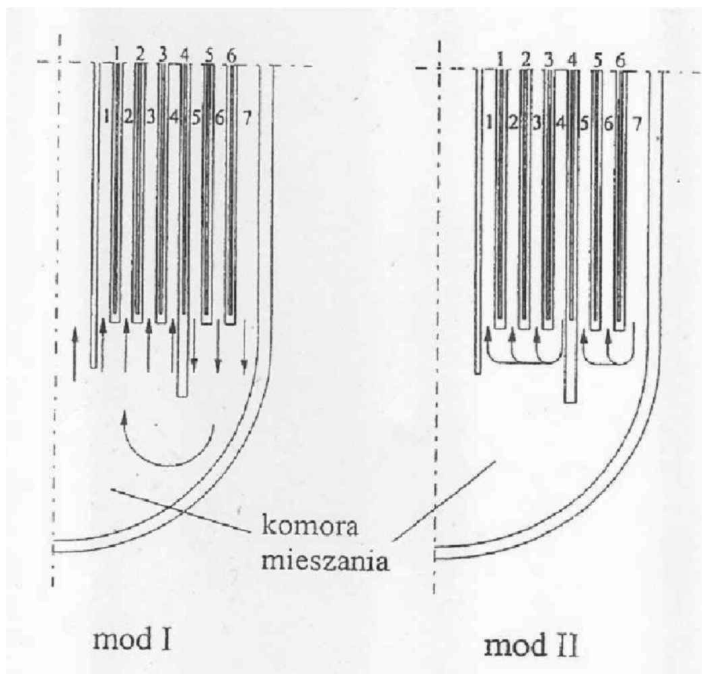
Szczególnie istotne jest to w przypadku prętów paliwowych o nietypowej, złożonej konstrukcji, jakie zastosowano w reaktorze jądrowym MARIA w Świerku. Pręty paliwowe

(rys. 1) tego reaktora w postaci rury Fielda są zanurzone w wypełnionych wodą kanałach powstałych w wycięciach bloków z berylu stanowiącego moderator [2]. Wewnątrz dolnej części pręta znajduje się element paliwowy, który składa się z wewnętrznej rurki nie zawierającej paliwa i pięciu dodatkowych cienkościennych (grubość 2 mm) koncentrycznych rur paliwowych przymocowanych do wewnętrznej rury elementu Fielda. Rura ta zawiera również warstwę paliwa na długości takiej jak pozostałe rury elementu paliwowego (1 m) i stanowi czwartą, licząc od środka, z sześciu rurek paliwowych elementu paliwowego.

Podczas pracy reaktora i przy działających pompach cyrkulacyjnych woda chłodząca o podwyższonym ciśnieniu przepływa w taki sposób jak w elementach Fielda. Doprowadzana jest ona szczeliną zewnętrzną, przepływa wzdłuż zewnętrznych rurek paliwowych, odbierając od nich ciepło, w dolnej części pręta następuje zmiana kierunku jej przepływu, woda chłodzi następnie wewnętrzne rurki paliwowe i odprowadzana jest rurą wewnętrzną do króćca wylotowego pręta paliwowego. Stąd woda ta odprowadzana jest do obiegu zewnętrznego wyposażonego w poziome rury, pompy cyrkulacyjne i wymienniki ciepła. Wspomniane króćce znajdują się w górnej części pręta paliwowego, około 3 m ponad paliwem. Taka konstrukcja pręta paliwowego i obiegu chłodzenia ma istotne znaczenie z punktu widzenia wymiany ciepła, w tym również po wyłączeniu reaktora.



Rys. 1. Pręt paliwowy reaktora Maria [2]



Rys. 2. Hipotetyczny przepływ chłodziwa w komorze dolnej elementu paliwowego [2]

Chłodzenie powyłaczeniowe odbywa się na trzy sposoby. Po wyłączeniu reaktora i zaniku praktycznie reakcji rozszczepienia pompy cyrkulacyjne wody chłodzącej pracują jeszcze przez pewien okres, zapewniając intensywne chłodzenie paliwa, jak podczas pracy reaktora.

Jak wykazuje wieloletnia praktyka, po kilkunastu minutach możliwe jest bezpieczne wyłączenie tych pomp. Pojawia się wtedy cyrkulacja naturalna chłodziwa wynikająca z jego podgrzewania prowadzącego do zróżnicowania gęstości. Jak sugerują wyniki pomiarów, możliwe są wówczas dwa przypadki (rys. 2). Najpierw siły hydrostatyczne są na tyle duże, że cyrkulacja ta obejmuje również fragment obiegu zewnętrznego, z wyłączeniem pomp i wymienników ciepła (ich obejście jest realizowane za pomocą tzw. spinek, jest to wg. [2] tzw. mod I). W okresie późniejszym obserwuje się wzrost temperatury chłodziwa w rejonie elementów paliwowych (rys. 3). Tłumaczy się to tym, że siły hydrostatyczne wynikające ze zróżnicowania gęstości wody w rurze wewnętrznej i szczeliny zewnętrznej pręta paliwowego są słabsze i nie wystarczają do pokonania oporów przepływu w części zewnętrznej obiegu. Cyrkulacja wody zachodzi jedynie wewnątrz pręta w rejonie bezpośredniego sąsiedztwa rurek paliwowych (mod II). Efektem tego jest właśnie wzrost temperatury zarówno wody w strefie paliwowej, jak też samego paliwa reaktorowego. Szczególnie istotne jest podwyższenie się maksymalnej temperatury wody, gdyż temperatura ta nie powinna osiągać wartości temperatury nasycenia. Generalnie, znajomość pola temperatury w paliwie i w chłodziwie wodnym w różnych stanach pracy reaktora i po jego wyłączeniu, umożliwiającą określenie maksymalnych wartości temperatury i miejsca ich występowania, jest niezbędna podczas przeprowadzania analiz bezpieczeństwa dla rozpatrywanego reaktora.

Hipoteza o występowaniu dwojakiego rodzaju cyrkulacji naturalnej w elemencie paliwowym reaktora „Maria” w stanach powyłączeniowych wynika, jak już wspomniano, z dokonanych pomiarów temperatury tego chłodziwa w części zewnętrznej i wewnętrznej elementu ponad rurkami paliwowymi [2]. Podstawowym celem pracy jest z jednej strony weryfikacja zastosowanego modelu transportu ciepła i wody w elemencie paliwowym reaktora „Maria” w warunkach cyrkulacji naturalnej po wyłączeniu tego reaktora oraz sprawdzenie ww. hipotezy poprzez porównanie rezultatów obliczeń i rezultatów wybranych pomiarów. Kolejnym celem wykonanych symulacji jest określenie maksymalnych temperatur jakie mogą się pojawić w elemencie paliwowym reaktora „Maria” w prawdopodobnych stanach powyłączeniowych.

Jak już wspomniano, konstrukcja reaktora „Maria” jest w skali światowej unikalna. Brak jest prac poświęconych dokładniejszym obliczeniom ciepło-przepływowym prętów paliwowych tego reaktora, uwzględniających złożoność naturalnej cyrkulacji chłodziwa w stanach powyłączeniowych. Takie możliwości pojawiły się przy wykorzystaniu coraz szerzej stosowanych współcześnie kodów numerycznej mechaniki płynów (CFD – Computational Fluid Dynamic). W niniejszej pracy prezentowane są wyniki symulacji przepływu ciepła i wody w elemencie paliwowym reaktora „Maria” po jego wyłączeniu wykorzystujących komercyjny pakiet CFD FLUENT [3]. Wyniki wstępnych obliczeń tego typu prezentowano w pracy [4]. Dotyczyły one jednak jedynie modu II, który wymuszono, sztucznie blokując przepływ przez pętlę zewnętrzną. Obszar obliczeniowy obejmował jedynie bezpośrednie otoczenie elementu paliwowego, podczas gdy obecnie obejmuje on cały pręt paliwowy.

## 2. CHARAKTERYSTYKA MODELU NUMERYCZNEGO I PRZYJĘTYCH DANYCH LICZBOWYCH

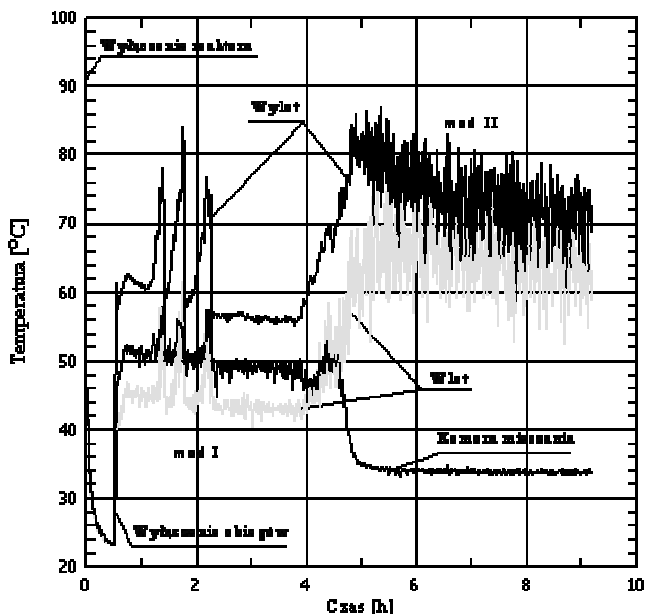
Dla potrzeb opisanej analizy przyjęto, że w obszarze rozpatrywanego pręta paliwowego występuje w stanach powyłączeniowych przejściowy lub burzliwy ustalony przepływ wody – lepkiego płynu newtonowskiego i ustalony transport energii. Założono standardowy model  $k-\omega$  turbulencji. Przepływ wody jest opisany stosownymi dla takiego przypadku równaniami [5] rozwiązywanymi za pomocą pakietu FLUENT:

- ciągłości,
- momentów Reynoldsa,
- transportu energii kinetycznej turbulencji  $k$  i dyssypacji właściwej  $\omega$
- bilansu energii w obszarze płynu i obszarach stałych (paliwo, koszulka, rury elementu Fielda).

Założono, że ciepło powyłłączeniowe jest generowane wyłącznie w paliwie, jego wydajność objętościowa jest stała w chwili  $\tau$  ( $\tau=0$  – moment wyłączenia reaktora) i zależy w poszczególnych rurach paliwowych tylko od współrzędnej pionowej  $z$  [2]

$$\dot{q}_{v\tau} = \dot{q}_{v\tau 0} \cos(2 * z / \beta) / \sin(1 / \beta) \quad (1)$$

Założono pseudoustalony przepływ ciepła w stanach powyłczeniowych. Moc cieplna i wydajność źródeł ciepła powyłczeniowego zmienia się bowiem bardzo wolno z czasem, proporcjonalnie do  $\tau^{-0.2}$  [1]. Poszczególne wielkości w powyższym wzorze oznaczają:  $\dot{q}_{v\tau 0} = \bar{q}_{v\tau} / \beta$  wydajność wewnętrznych źródeł ciepła w chwili  $\tau$  w środku rury paliwowej, tj. dla  $z=0$ ,  $\bar{q}_{v\tau}$  – średnią wydajność wewnętrznych źródeł ciepła w tej rurze,  $\beta = 0.7$  współczynnik nierównomierności osiowego rozkładu wydajności źródeł ciepła,  $\tau$  - czas w [s] od momentu wyłączenia reaktora. Symulacje wykonywano dla wybranych chwil czasu po wyłączeniu reaktora. Udział ciepła generowanego w poszczególnych rurach paliwowych w stosunku do mocy całego pręta przyjęto (licząc od środka) według [2]: 0.075, 0.101, 0.132, 0.172, 0.223, 0.298.



Rys. 3. Przebiegi temperatury chłodziwa w warunkach konwekcji naturalnej [2]

Dwuwymiarowy, osiowo – symetryczny obszar obliczeniowy obejmuje wnętrze pręta paliwowego o wysokości około 4m (od komory mieszania u dołu do strefy króćców u góry) i obejmuje zawarty w nim płyn (woda), rurę wewnętrzną elementu Fielda zawierającą paliwo w obszarze elementu paliwowego i pozostałe rury paliwowe. Jest on więc ograniczony osią symetrii, ściankami wewnętrznymi pręta paliwowego oraz od góry wlotem do szczeliny zewnętrznej i wylotem z rury wewnętrznej. Obliczenia wykonywano przy różnych wartościach różnicy ciśnienia pomiędzy wlotem i wylotem, która w warunkach powyłączeniowych wynika ze spadku ciśnienia w części obiegu na zewnątrz pręta. Na ściankach pręta założono warunek brzegowy typu „wall” i brak poślizgu płynu oraz warunek brzegowy III rodzaju dla równania bilansu energii ( $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $313 \text{ K}$ ). Założono typowe, zależne od temperatury i niezależne od ciśnienia parametry wody. W szczególności gęstość przyjęto, poczynając od temperatury  $333 \text{ K}$  z krokiem  $20 \text{ K}$ , odpowiednio równą:  $998, 988, 978, 965, 951, 935, 917 \text{ kg}/\text{m}^3$  [6], interpolowaną liniowo. Dla wykonanych z aluminium rury wewnętrznej i koszulek rur paliwowych przyjęto parametry termofizyczne typowe dla aluminium, dla paliwa zaś wykonanego ze stopu Al i wzbogaconego uranu metalicznego założono: gęstość  $\rho = 4800 \text{ kg}/\text{m}^3$ , współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda = 135 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  oraz pojemność cieplną właściwą  $c_p = 800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  [2].

Obszar obliczeniowy zawiera około 700 tys. elementów, prostokątnych w obszarze stałym i w obszarze płynu w otoczeniu elementu paliwowego, jak też w górnej części pręta oraz trójkątnych pomiędzy tym obszarami płynu.

Symulacje dla poszczególnych wariantów wykonywano, dochodząc do stanu ustalonego, jako do rozwiązania asymptotycznego poprzez stany nieustalone oraz kontrolując temperatury w wybranych przekrojach i bilans chłodziwa.

### 3. WYBRANE WYNIKI OBLICZEŃ

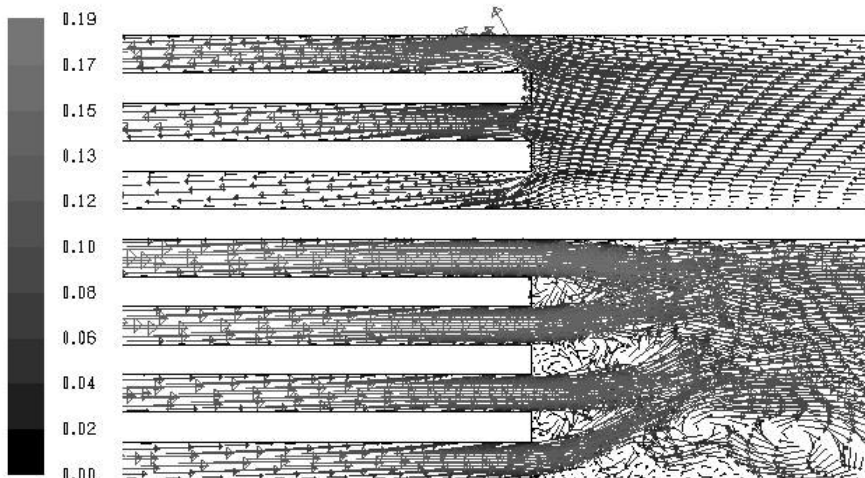
Przykładowe obliczenia wykonano dla mocy powyłączeniowych  $N_{Q_w}$  pręta równych 15, 10 i 5 kW. Przy założeniu mocy pręta przed wyłączeniem  $N_{Q_0}$  równej 1.06 MW, dla której wykonywane były pomiary pokazane na rys. 3, powyższe moce powyłączeniowe pojawiłyby się, odpowiednio, 45 min, 5.5 h i 8 dni po wyłączeniu reaktora. Obliczenia realizowano przy założeniu stałych wartości różnicy ciśnienia  $\Delta p$  pomiędzy wylotem z pręta z rury wewnętrznej i wlotem do kanału międzyrurowego. Różnice te wynikają w rzeczywistości, jak już wspomniano, z oporów przepływu wody chłodzącej w zewnętrznej części obiegu chłodzenia pręta i są one równoważone przez siły wyporu pojawiające się na skutek różnic gęstości wody w rurze wewnętrznej pręta i w kanale międzyrurowym. Opory przepływu są naturalnie zależne od prędkości wody w części obiegu poza pręt. Usytuowanie spinek łączących kolektory wody chłodzących jest różne w stosunku do poszczególnych elementów paliwowych co sprawia, że opory zewnętrzne są różne dla poszczególnych prętów paliwowych.

Obliczenia realizowano dla każdej z ww. mocy, dobierając początkowo różnicę ciśnienia  $\Delta p$  na tyle małą, że woda przepływa ku dołowi wszystkimi szczelinami pomiędzy rurami paliwowymi w kanale opadowym (szczeliny 5, 6 i 7 na Rys.2), a później ku górze szczelinami (1, 2, 3 i 4) w rurze wewnętrznej. Następnie zwiększano różnicę ciśnienia do wartości  $\Delta p_I$  takiej, powyżej której pojawia się recyrkulacja w szczelinach. Dalsze zwiększanie tej różnicy prowadzono do jej wartości  $\Delta p_{II}$ , powyżej której następuje odwrócenie kierunku przepływu chłodziwa, tj. woda dopływa do rury wewnętrznej, a wypływa kanałem zewnętrznym, przy braku recyrkulacji w szczelinach. Taka sytuacja nie ma już naturalnie fizycznego uzasadnienia.

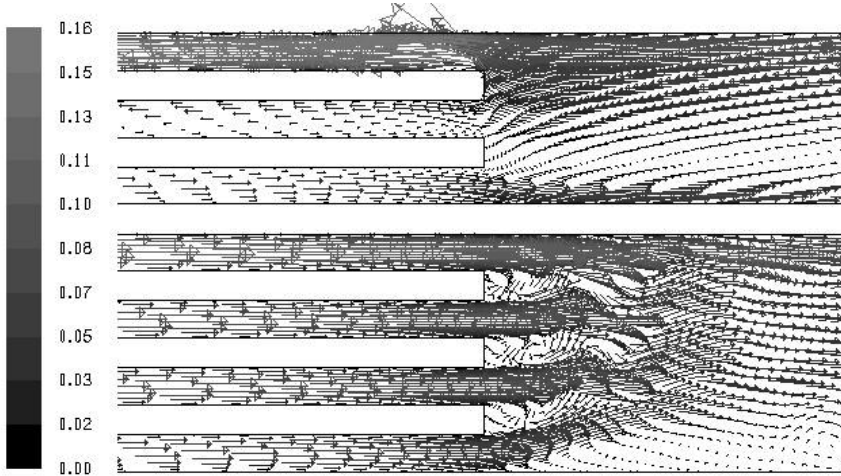
Wybrane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1 oraz zilustrowano na rs. 4 ÷ 9. Generalnie dotyczą one przypadków różnicy ciśnienia  $\Delta p$  nieco niższej od  $\Delta p_I$ , przy której recyrkulacja w obszarze rur paliwowych jeszcze nie występuje (warianty 1, 3 i 5 z tabeli 1) oraz nieco niższej od  $\Delta p_{II}$ , powyżej której następuje odwrócenie kierunku przepływu. W tabeli 1 zestawiono strumienie masy chłodziwa w szczelinach pomiędzy rurami paliwowymi (numeracja jak na rys. 2) dla ww. wartości różnicy ciśnienia  $\Delta p$  i rozpatrywanych wartości mocy powyłaczeniowej pręta paliwowego  $N_{Qw}$ . Szczeliny 1, 2, 3 i 4 znajdują się w obszarze rury środkowej pręta paliwowego, szczeliny 5, 6 i 7 zaś w obszarze kanału opadowego. Na rys. 4 i 5 pokazano przykładowo otrzymane rozkłady prędkości chłodziwa w górnej części rur paliwowych, w obszarze wlotu/wylotu ze szczelin pomiędzy tymi rurami dla wariantu 3 i 4.

Tabela 1. Zestawienie strumieni masowych wody w górnej części poszczególnych szczelin (numeracja jak na rys. 2.) w kg/s dla różnych wartości mocy powyłaczeniowej kanału  $N_{Qw}$  oraz różnych wartości  $\Delta p$  w kPa; kierunek dodatni oznacza przepływ do góry

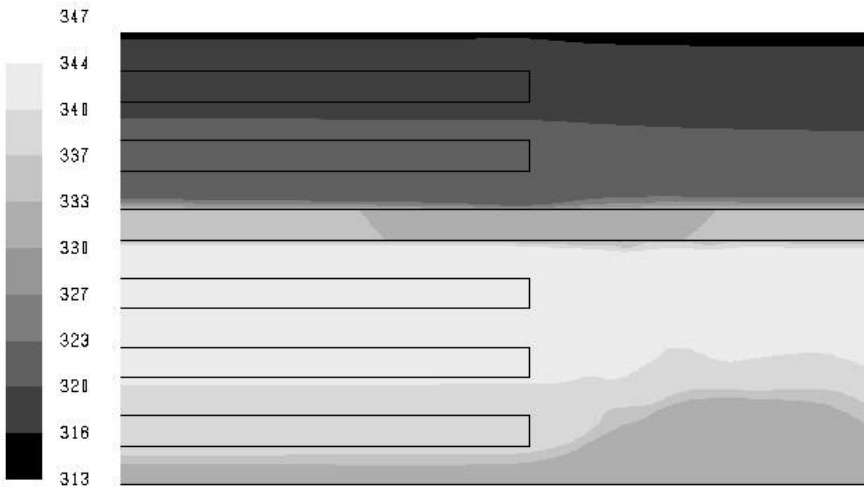
Wariant	1	2	3	4	5	6
$N_{Qw}$ , kW	5	5	10	10	15	15
Nr kanału	$\Delta p=70$ kPa $\approx \Delta p_I$	$\Delta p=280$ $\approx \Delta p_{II}$	$\Delta p=100$ $\approx \Delta p_I$	$\Delta p=350$ $\approx \Delta p_{II}$	$\Delta p=200$ $\approx \Delta p_I$	$\Delta p=550$ $\approx \Delta p_{II}$
1	0.0052	0.0006	0.0117	0.0058	0.0137	0.0026
2	0.0109	0.0018	0.0213	0.0124	0.0235	0.0086
3	0.0187	0.0025	0.0313	0.0172	0.0328	0.0110
4	0.0332	0.0027	0.0432	0.0277	0.0461	0.0207
5	0.0000	0.0090	-0.0174	0.0088	-0.0049	0.0165
6	-0.0233	0.0093	-0.0359	-0.0049	-0.0450	0.0110
7	-0.0447	-0.0261	-0.0543	-0.0674	-0.0663	-0.0701



Rys. 4. Wektory prędkości chłodziwa w obszarze górnych części rur paliwowych dla mocy powyłaczeniowej równej 10 kW i różnicy ciśnienia  $\Delta p=100$  Pa; u góry kanał opadowy, niżej rura wewnętrzna



Rys. 5. Wektory prędkości chłodziwa w obszarze górnych części rur paliwowych dla mocy powyłączeniowej równej 10 kW i różnicy ciśnienia  $\Delta p=350$  Pa

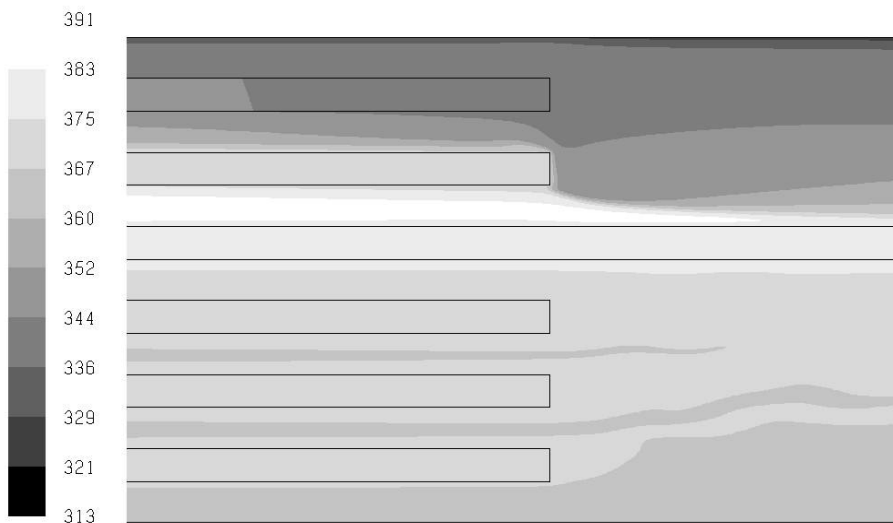


Rys. 6. Pole temperatury (w K) w obszarze górnych części rur paliwowych dla mocy powyłączeniowej równej 10 kW i różnicy ciśnienia  $\Delta p=100$  Pa

W wariancie 3, dla  $\Delta p=100 \text{ Pa} \leq \Delta p_I$ , chłodziwo przepływa ku dołowi przez wszystkie szczeliny pomiędzy rurami paliwowymi w kanale opadowym i ku górze przez wszystkie szczeliny w rurze wewnętrznej, na co wskazują również wyniki pokazane w tabeli 1. Dla  $\Delta p > \Delta p_I$  pojawia się recyrkulacja chłodziwa w obszarze paliwa w kanale opadowym. Widać to w wariancie 4, dla  $\Delta p=350 \text{ Pa} \leq \Delta p_{II}$  (rys. 5, tabela 1). W szczelinie 5 w kanale opadowym chłodziwo przepływa ku górze, w szczelinie 6 pojawiają się w tym przypadku zawirowania, dominujący jest jednak przepływ ku dołowi, w zewnętrznej szczelinie 7 zaś ma miejsce przepływ ku dołowi. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach zwiększanie

różnicy ciśnienia  $\Delta p$  ponad  $\Delta p_{II}$  (dla  $N_{Qw} = 10$  kW  $\Delta p_{II}$  jest nieco wyższe od 350 kPa) powoduje wspomniane już niefizyczne całkowite odwrócenie przepływu. Obliczenia nie potwierdzają więc do końca hipotezy postawionej w raporcie [2] i zilustrowanej na rys. 2. Recyrkulacja chłodziwa w obszarze rur paliwowych w przypadku wystąpienia modu II po wyłączeniu reaktora występuje, ale jedynie w kanale opadowym.

Uzyskane dla wybranych przypadków pola temperatury przedstawiono na rys. 6 – 9. Na rys. 6 i 7 pokazano pola temperatury w górnej części rur paliwowych pręta paliwowego, odpowiednio dla wariantu 3 i 4. Rys. 8 zawiera wykresy przebiegu temperatury na powierzchniach koszulek poszczególnych rur paliwowych numerowanych licząc od strony wnętrza pręta paliwowego (dolnej na rysunkach,  $x \in [0.18, 1.22]$  - zakres współrzędnej pionowej paliwa), rys. 9 zaś przebiegi temperatury w funkcji promienia w wybranych przekrojach poprzecznych. Oba ostatnie rysunki dotyczą wariantu 4.

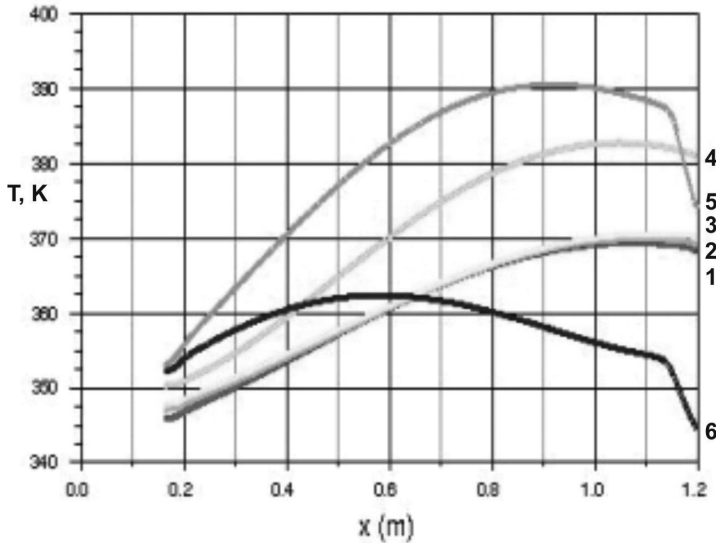


Rys. 7. Pole temperatury (w K) w obszarze górnych części rur paliwowych dla mocy powyłączeniowej równej 10 kW i różnicy ciśnienia  $\Delta p = 350$  Pa

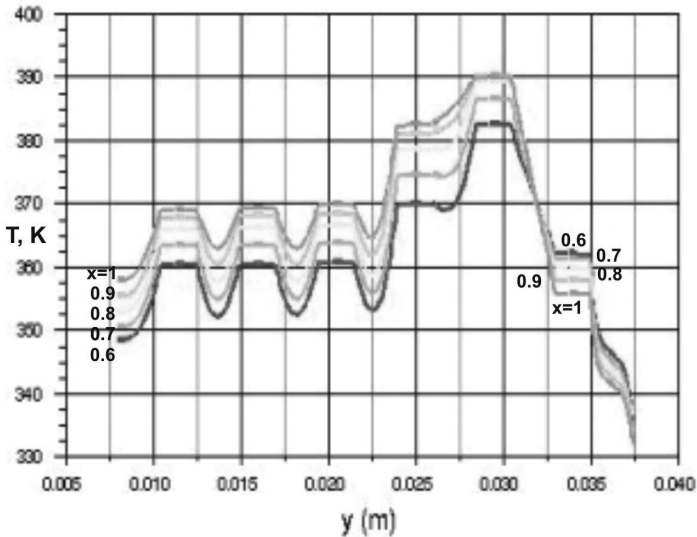
Maksymalna temperatura w obszarze w wariantcie 3 wynosi jak widać 347 K (74 °C), w wariantcie 4 zaś, kiedy występuje recyrkulacja chłodziwa, 391 K (118 °C). Jak już wspomniano, warianty te dotyczą chwili 5.5 h po wyłączeniu reaktora, kiedy występuje mod II z recyrkulacją chłodziwa. Temperatury zmierzone wówczas ponad rurami paliwowymi oscylują w przedziałach (rys. 3): 58 ÷ 72 °C w kanale opadowym i 70 ÷ 82 °C w rurze wewnętrznej. Przy występowaniu wspomnianej recyrkulacji chłodziwa (wariant 4), uśredniona temperatura obliczeniowa dla tej chwili czasu w przekroju pręta paliwowego na poziomie punktów pomiarowych ponad paliwem wynosi 71 °C w kanale opadowym i 96 °C w rurze wewnętrznej. W przypadku szczeliny opadowej jest to więc temperatura na poziomie maksymalnej zmierzonej, zaś w przypadku rury wewnętrznej wyraźnie większa od zmierzonej. Jeżeli natomiast założycie istnienie cyrkulacji zewnętrznej chłodziwa dla tej chwili czasu (wariant 3), to temperatury te odpowiednio wynoszą: 46 °C i 66 °C, a więc są nieco niższe od zmierzonych. Na tej podstawie można przypuszczać, że w stanach powyłączeniowych, podczas tzw. modu II, nie występuje w sposób trwały recyrkulacja



chłodziwa obejmująca jedynie obszar elementów paliwowych, jak pokazano na rys. 2, lecz najprawdopodobniej recyrkulacja ta występuje przemiennie z cyrkulacją obejmującą zewnętrzną część pętli chłodziwa, jak podczas modu I. Wskazują na to również znaczne wahania temperatury chłodziwa ponad paliwem zmierzone podczas modu II. Zmiana charakteru cyrkulacji chłodziwa prowadzi bowiem do wyraźnych zmian poziomu temperatury w paliwie i jego otoczeniu.



Rys. 8. Rozkład temperatury na wewnętrznych powierzchniach koszulek rur paliwowych w funkcji wysokości dla wariantu 4



Rys. 9. Rozkłady temperatury w wybranych przekrojach w obszarze rur paliwowych w funkcji promienia dla wariantu 4

#### 4. WNIOSKI

W pracy przeanalizowano wyniki modelowych obliczeń przepływu ciepła i masy w przecie paliwowym reaktora „Maria”. Analiza dotyczy stanów powyłączeniowych, kiedy wyłączone są pompy cyrkulacyjne i występuje w przecie zidentyfikowany na podstawie pomiarów tzw. mod II charakteryzujący się najwyższymi po wyłączeniu pomp temperaturami. Wyniki obliczeń skonfrontowano z wynikami pomiarów. Poziom obliczeniowych i pomiarowych temperatur chłodziwa ponad rurami paliwowymi jest zgodny. Obliczenia wykonywano, zakładając stan ustalony. Zaobserwowane silne oscylacje zmierzonej temperatury chłodziwa występujące w tym stanie reaktora wskazują na to, że mają miejsce wówczas zmiany charakteru cyrkulacji naturalnej chłodziwa w prętach paliwowych. Trudno więc oczekiwać dokładniejszej zgodności temperatur obliczeniowych i pomiarowych.

Maksymalne temperatury obliczeniowe chłodziwa, również przy ściankach rur paliwowych, są znacznie niższe od dopuszczalnej, za jaką uważa się temperaturę nasycenia równą około 180 °C. Dotyczy to również przypadków, kiedy przyjęto pesymistyczne założenia odnośnie do różnicy ciśnienia  $\Delta p$  pomiędzy wlotem i wylotem chłodziwa z pręta paliwowego,

Obliczenia nie potwierdzają do końca hipotezy postawionej w raporcie [2] i zilustrowanej na rys. 2. Recyrkulacja chłodziwa w obszarze rur paliwowych w przypadku wystąpienia modu II po wyłączeniu reaktora występuje, ale jedynie w kanale opadowym. Ponadto, jak już wspomniano, nie występuje w sposób trwały, lecz przemienne z cyrkulacją obejmującą zewnętrzną część pętli chłodziwa, jak podczas modu I.

#### LITERATURA

10. Celiński Z., Strupczewski A.: Podstawy energetyki jądrowej. Warszawa:WNT, 1984.
11. Pytel K. i in.: Eksploatacyjny raport bezpieczeństwa reaktora MARIA. Rozdz. 5: Reaktor – konstrukcja i charakterystyki. Świerk, czerwiec 2004.
12. FLUENT - dokumentacja techniczna.
13. Składzien J., Fic A.: Powyłączeniowe prądy konwekcyjne w prętach paliwowych reaktora Maria. „Archiwum Energetyki” 2008, T XXXVIII, No 2, p. 193 – 200.
14. Chung T.J.: Computational fluid dynamic. Cambridge University Press, 2002.
15. Gogół W.: Wymiana ciepła, tablice i wykresy. Skrypt PW. Warszawa 1974.

#### **NUMERICAL ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER IN THE FUEL ELEMENT OF THE REACTOR “MARIA” AFTER REACTOR SHUTDOWN**

Summary. Decay heat generated in the nuclear fuel after reactor shutdown requires to continue cooling the fuel. Experience shows that cooling pumps of the reactor Maria can be disengaged at some time instant after reactor shutdown. Intensive enough cooling of the reactor fuel can be then guaranteed by natural water circulation. Results of simulations of the temperature and velocity fields of coolant within fuel elements of the reactor Maria after its shutdown when the natural circulation of coolant exists are discussed in the paper.