

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zasadniczą część pracy stanowią badania eksperymentalne, przeprowadzone w instalacji WIW-300 w zbocznikowanym, równoległym kanale pionowym, o geometrii pierścieniowej ( $L=1$  m,  $L/D_w=50$ ,  $\delta=0,0015$  m), przy przepływie wody w dół, w warunkach przepływu przejściowego i przy równomiernym doprowadzaniu ciepła do powierzchni wewnętrznej. Wykonano około 200 eksperymentów, w tym zmierzono krytyczne strumienie ciepła i zarejestrowano 40 filmów z przebiegu procesu wrzenia pęcherzykowego w kanale pierścieniowym.

Zaobserwowano wyraźną zależność gęstości krytycznego strumienia ciepła od objętościowego natężenia przepływu, niedogrzanania i ciśnienia początkowego cieczy oraz spadku ciśnienia na długości kanału pierścieniowego. Jeśli powyższe parametry rosną, rośnie też krytyczny strumień ciepła. Zależności te nie są liniowe, lecz zbliżone do wykładniczych. Obserwacja ta została wykorzystana przy podejmowaniu decyzji o wyborze postaci funkcji określającej strumień krytyczny.

Na podstawie analizy danych eksperymentalnych zaproponowano korelację, uzależniającą gęstość krytycznego strumienia ciepła w kanale pręta kompensacyjnego reaktora MARIA od parametrów wlotowych, której zgodność z pomiarami wynosi  $\pm 10\%$ :

$$q_{kr} = A \cdot Q_0 \cdot \Delta p^{-0,123} \rho \cdot (T_s - T_0)^{0,95} p_0^{0,458} \quad (7.2.4)$$

gdzie:  $A$  – stała ( $A=72$ );

$Q_0$  – objętościowe natężenie przepływu,  $m^3 s^{-1}$ ;

$\Delta p$  – spadek ciśnienia na wlocie do kanału, MPa;

$\rho$  – gęstość wody w temperaturze nasycenia,  $kg m^{-3}$ ;

$T_0$  – temperatura początkowa wody,  $^{\circ}C$ ;

$T_s$  – temperatura nasycenia wody,  $^{\circ}C$ ;

$p_0$  – ciśnienie wody na wejściu do kanału, MPa.

Stwierdzono, że przy przepływie pierścieniowym w kanale pręta kompensacyjnego reaktora MARIA, średni stosunek gęstości strumienia ciepła inicjującego wrzenie do gęstości krytycznego strumienia ciepła wynosi:

$$(q_{ONB}/q_{kr})_{sr} = 0,86$$

Daje to możliwość jednoczesnego wykorzystania korelacji (6.2.4) do wyznaczania obu charakterystycznych gęstości strumienia ciepła.

Bliskość strumienia ciepła inicjującego wrzenie do strumienia krytycznego jest szczególnie niebezpieczna w warunkach reaktorowych, gdyż może prowadzić do awarii typu LOFA w kanale pręta kompensacyjnego. Sytuacja taka jest niedopuszczalna, tym bardziej, że przy wielu szczelinach równoległych w matrycy berylowo-grafitowej, wrzenie w jednej ze szczelin może nie być w porę zauważone. Stąd wniosek, że inicjacja wrzenia jest niedopuszczalna, gdyż przy niewielkim wzroście gęstości strumienia ciepła prowadzić może do kryzysu wrzenia pęcherzykowego.

Zastosowany w pracy sposób wyznaczania gęstości krytycznego strumienia ciepła i inicjującego wrzenie, z wykorzystaniem metody Madejskiego, okazał się skuteczny przy przepływie przejściowym w kanale pierścieniowym. Stwierdzono, że błąd zastosowanej metody obliczeń waha się w granicach -6% do+12%, co w porównaniu z dostępnymi w literaturze modelami jest dobrym rezultatem.

Znaczącą część pracy stanowiły *badania wizualizacyjne* wrzenia w przepływie przez kanał pierścieniowy, symulujący kanał pręta kompensacyjnego reaktora MARIA. Uzyskane filmy poddano analizie obrazu. Porównano przedstawiane w literaturze rodzaje przepływów podczas wrzenia przy przepływie wymuszonym w kanale do tych, zaobserwowanych podczas eksperymentów w kanale pierścieniowym. Stwierdzono, że w warunkach przepływu przejściowego występują dotychczas nie opisane, nowe rodzaju przepływu dwufazowego, których występowanie zależne jest głównie od objętościowego natężenia przepływu cieczy przez szczelinę pierścieniową i gęstości strumienia ciepła na powierzchni grzejnej.

Na podstawie wizualizacji przepływu stwierdzono, że przebieg procesu wrzenia w kanale pierścieniowym, z równomiernym doprowadzaniem strumienia ciepła do powierzchni wewnętrznej, w warunkach przepływu przejściowego, różni się od procesu wrzenia w kanale cylindrycznym kolejno występującymi rodzajami przepływu.

Wyodrębniono *nowe rodzaje przepływów: korkowo-falowy i falowo-pierścieniowy*.

Zaobserwowano, że przy niskich prędkościach przepływu ( $U \leq 0,7 \text{ m s}^{-1}$ ) podczas wrzenia w kanale pierścieniowym, w funkcji narastającej gęstości strumienia ciepła, występują kolejno po sobie: przepływ pęcherzykowy, falowo-pierścieniowy, pierścieniowy i mgłowy. Przepływ falowo-pierścieniowy charakteryzuje się wyraźnym czołem fali osuszającej powierzchnię grzejną, która porusza się ruchem przyspieszonym w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu. Przy wyższych prędkościach przepływu obserwowano kolejno występujące po sobie: przepływ pęcherzykowy, pęcherzykowo-korkowy, korkowy, korkowo-falowy, falowo-pierścieniowy, pierścieniowy i mgłowy.

Charakter zmian rodzaju przepływu w funkcji gęstości strumienia ciepła jest dynamiczny. Po wystąpieniu kryzysu wrzenia pęcherzykowego i wyłączeniu doprowadzania ciepła, występują silne fluktuacje ciśnienia i zaburzenia, w postaci uderzeń hydrodynamicznych.

Obserwowane osuszanie wewnętrznej powierzchni grzejnej przekroju pierścieniowego, w postaci postępującego czoła fali pary, jest charakterystyczne dla zbcznikowanego przepływu równoległego, o stałym spadku ciśnienia na długości kanału.

W pracy określono chwilowe prędkości poruszania się pęcherzyków pary podczas przepływu pęcherzykowego. Stwierdzono, że powstające pęcherzyki pary początkowo

ślizgają się po powierzchni grzejnej, intensyfikując wymianę ciepła. Oszacowano, że największa prędkość poślizgu nie przekraczała  $0,7 \text{ m s}^{-1}$ . Podobne prędkości pęcherzyków pary otrzymano w literaturze w wyniku symulacji komputerowej, przy zastosowaniu trójwymiarowego modelu przepływu.

Podsumowując, należy podkreślić, że przebieg procesu wrzenia w przepływie w dół przez kanał pierścieniowy jest złożony i ma charakter stochastyczny. Sekwencja występujących kolejno po sobie rodzajów przepływu zależy nie tylko od prędkości płynu i gęstości strumienia ciepła, ale również od tego, czy wielkości te rosną czy maleją. Uogólnienie wyników badań w opisanych warunkach, jest szczególnie trudne.

Można przyjąć, że skutecznym sposobem powinno być zastosowanie metod probabilistycznych, np. metody Monte Carlo, do opisu zachowania się pęcherzyków pary podczas przepływu szczególnie w kanale pierścieniowym, zarówno dla narastającej, jak i malejącej gęstości strumienia ciepła.

Oznacza to konieczność prowadzenia dalszych badań eksperymentalnych jak te, wykonane w niniejszej pracy, ze szczególnym wykorzystaniem efektów wizualizacji przepływu i doskonalszych technik komputerowej analizy obrazu, które pozwolą w przyszłości na uzyskanie uniwersalnego modelu wymiany ciepła i masy podczas przepływu z wrzeniem.

Przedstawione w niniejszej pracy wnioski naukowe były podstawą podjęcia decyzji inżynierskich, dotyczących możliwości zmiany parametrów eksploatacyjnych reaktora badawczego MARIA.

Stwierdzono, że graniczna, średnia moc czterech elementów paliwowych, otaczających pręt kompensacyjny w reaktorze MARIA, może być podniesiona do wartości wyższej niż dotychczas przyjmowana 1,4 MW, przy znacznie niższym spadku ciśnienia niż 0,018 MPa.

Końcowy *wniosek praktyczny*, będący rezultatem przeprowadzonych prac badawczych sformułowano w następującej postaci:

- średnia moc cieplna czterech elementów paliwowych, otaczających kanał pręta kompensacyjnego może być podniesiona do 1,8 MW, przy spadku ciśnienia na matrycy berylowo-grafitowej obniżonym do 0,014 MPa.

Wniosek ten był podstawą do podniesienia limitów, określających bezpieczną pracę reaktora MARIA. Po ich zatwierdzeniu przez Departament Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej Ministerstwa Gospodarki, zostały one wprowadzone do „Eksploatacyjnego Raportu Bezpieczeństwa reaktora MARIA” [71].

Podsumowując, należy stwierdzić, że postawione cele pracy zostały zrealizowane, a do najważniejszych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

- wyodrębnienie nowych rodzajów przepływów: korkowo-falowego i falowo-pierścieniowego,
- unikalny zapis przebiegu procesu wrzenia w kanale pierścieniowym począwszy od jego inicjacji aż do kryzysu wrzenia,
- określenie chwilowych prędkości poruszania się pęcherzyków pary podczas przepływu pęcherzykowego,
- uzyskanie korelacji na gęstość krytycznego strumienia ciepła,

- istotną obserwację dotyczącą bliskości inicjacji i kryzysu wrzenia pęcherzykowego w przepływie cieczy niedogrzonej,
- potwierdzenie skuteczności zastosowania metody Madejskiego do wyznaczania gęstości strumienia ciepła inicjującego wrzenie,
- uzyskanie wyniku praktycznego, dopuszczającego pracę reaktora MARIA przy podwyższonych parametrach eksploatacyjnych.