

Janusz Lewandowski, Marek Mościcki

Instytut Techniki Ciepłej PW

PORÓWNANIE GRANICZNYCH MODELI ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ PARY W BUDYNKU REAKTORA W TRAKCIE AWARII TYPU LOCA

W pracy przedstawiono dwa skrajne modele rozprzestrzeniania się pary wodnej w budynku reaktora w trakcie maksymalnej awarii projektowej. Dokonano porównania wyników obliczeń uzyskanych za pomocą modelu „łokowego” oraz modelu „natychmiastowego wymieszania”. Oceniono przydatność modeli do analizy bezpieczeństwa siłowni jądrowych z reaktorami PWR.

WYKAZ OZNACZEŃ

- c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
 G – masowe natężenie przepływu [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
 h – entalpia właściwa [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]
 M – masa [kg]
 p – ciśnienie [MPa]
 R – stała gazowa [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
 Q – energia [kJ]
 T – temperatura [K]
 t – czas [s]
 U – energia wewnętrzna [kJ]
 u – energia wewnętrzna właściwa [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]
 V – objętość [m^3]
 v – objętość właściwa [$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$]
 W – praca [kJ]
 χ – wykładnik adiabaty [-]

INDEKSY

- a – powietrze
 b – parametry czynnika opuszczającego obieg pierwotny

- m* – mieszanina
- s* – para wodna
- 0 – parametry początkowe

WSTĘP

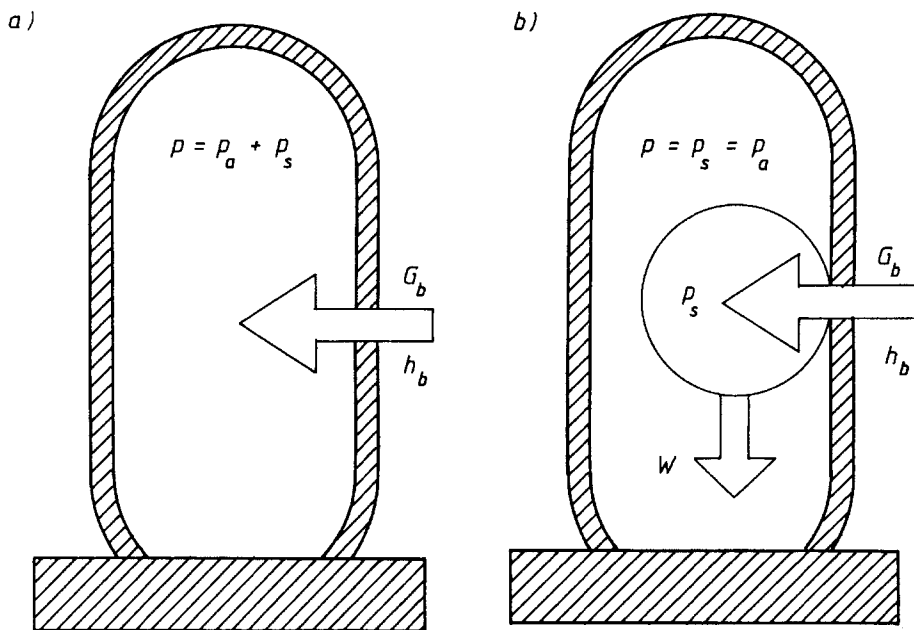
Maksymalna awaria projektowa reaktorów jądrowych chłodzonych wodą pod ciśnieniem (za którą uważa się natychmiastowe rozerwanie na pełnym przekroju głównego rurociągu doprowadzającego chłodziwo do reaktora) wywołuje między innymi wzrost ciśnienia w budynku reaktora. Wiąże się to z wyciekami i odparowaniem znacznej części chłodziwa znajdującego się w reaktorze przed awarią (dla typowych reaktorów energetycznych 200 do 300 m³ wody o ciśnieniu 10 do 18 MPa i temperaturze przekraczającej 570 K).

Istotnym elementem analizy bezpieczeństwa siłowni jądrowej jest określenie przebiegu zmian ciśnienia w budynku reaktora po awarii. Ze względu na złożoność procesów fizycznych towarzyszących awarii i złożoną geometrię budynku reaktora oraz długi czas trwania tego typu awarii współczesne programy komputerowe używane do symulacji zjawisk cieplno-przepływowych w budynku reaktora opierają się na modelach przestrzennie niezależnych [1, 2, 3]. W modelach tych budynek rozpatruje się jako układ połączonych ze sobą objętości, wypełnionych jednorodną mieszaniną parowo-powietrzną.

Ważnym elementem przestrzennie niezależnych modeli służących do symulacji zjawisk zachodzących w budynku reaktora jest model rozprzestrzeniania się pary powstałej z rozprężającego się chłodziwa w pomieszczeniu, w którym nastąpiła awaria. Powszechnie stosowany jest model „natychmiastowego wymieszania”, w którym zakłada się, że para wodna w pomijalnie krótkim czasie miesza się z powietrzem tworząc jednorodną, termodynamicznie równowagową mieszaninę o ciśnieniu równym sumie ciśnień cząstkowych pary i powietrza. Interesującą sprawą wydało się autorom sprawdzenie, jak wpłynie na wyniki symulacji zastosowanie innych założeń dotyczących rozprzestrzeniania się pary w budynku. Można bowiem przyjąć, że w pierwszej fazie awarii para opuszczająca obieg pierwotny reaktora nie miesza się z powietrzem, tworząc pewnego rodzaju kulisty tłok zwiększający swoją objętość wraz ze wzrostem ciśnienia. W tym przypadku energia dostarczona do budynku reaktora w parze wypływającej ze zbiornika jest przekazywana do powietrza wskutek wykonania pracy sprężania, ciśnienie powietrza jest zaś stale równe ciśnieniu pary w tłoku.

W dalszej części pracy przedstawiono skrócony opis modelu „natychmiastowego wymieszania” i modelu nazwanego przez autorów modelem „tłokowym” oraz wyniki numerycznej symulacji pierwszej fazy awarii uzyskane za pomocą obu modeli. Prezentowane modele w klasie modeli przestrzennie niezależnych odwzorowują dwa skrajne sposoby rozprzestrzeniania się pary w boksie reak-

tora. Krzywa zmian średniego ciśnienia w budynku reaktora, przy pominięciu efektów falowych związanych z procesem rozrywania rurociągu, powinna przebiegać między krzywymi uzyskanymi z tych modeli.



Rys. 1. Schemat obliczeniowy dla modelu „natychmiastowego wymieszania” (a) i modelu „łtokowego” (b)

W obliczeniach, których wyniki prezentowane są w pracy, przyjęto, że budynek reaktora składa się z jednego pomieszczenia (rys.1), co jest, niewątpliwie, daleko idącym uproszczeniem. Zdecydowano się na nie, gdyż w wypadku wystąpienia różnicy w wielkości poawaryjnych parametrów uzyskanych z obu modeli, brak podziału może jedynie uwydatnić te różnice. Z tych samych względów nie uwzględniono działania układów ograniczających skutki awarii (zraszanie i wentylacja budynku) oraz oddziaływania cieplnego czynnika z otoczeniem budynku (a więc i kondensację pary na ścianach). Pominięto także naturalną wilgotność powietrza w budynku reaktora, a więc przyjęto, że przed awarią para wodna w budynku nie występuje. Założenie to wydaje się być uzasadnione, gdyż masa, a w konsekwencji pojemność cieplna pary w budynku przed awarią, jest pomijalnie mała w stosunku do masy powietrza w układzie i masy pary dostarczanej do układu. Założono także, że cała woda opuszczająca obieg pierwotny odparowuje, co oczywiście jest dalekie od rzeczywistości, ale w naszej analizie będzie miało jednakowy wpływ na wyniki otrzymane za pomocą obu modeli.

1. MODEL „NATYCHMIASTOWEGO WYMIESZANIA”

Model „natchmiastowego wymieszania” skonstruowany został przy następujących założeniach:

- para wodna opuszczająca obieg pierwotny miesza się z powietrzem w sposób natchmiastowy, tworząc jednorodną mieszaninę, w której oba składniki mają tę samą temperaturę,
- ciśnienie mieszaniny jest równe (zgodnie z prawem Daltona) sumie ciśnień cząstkowych obu składników,
- para wodna traktowana jest jak gaz rzeczywisty, a powietrze jak gaz doskonały.

Przy założeniu, że pomieszczenie, w którym nastąpiła awaria, jest adiabatyczne, można zapisać, że prędkość zmian masy pary wynosi w chwili czasu t

$$\frac{dm(t)}{dt} = G_b(t) \quad (1)$$

a prędkość zmian energii wewnętrznej mieszaniny parowo-powietrznej

$$\frac{dU_m(t)}{dt} = G_b(t)h_b(t) \quad (2)$$

gdzie: G_b , h_b – odpowiednio, masowe natężenie i entalpia czynnika wpływającego z obiegu pierwotnego reaktora.

Przy wcześniej sformułowanych założeniach słuszne są dla powyższych równań następujące warunki początkowe

$$m_s|_{t=0} = 0 \quad \text{oraz} \quad U_m|_{t=0} = m_a c_{va} T_0$$

gdzie: m_s – masa pary w budynku reaktora,

m_a – masa powietrza w budynku reaktora,

c_{va} – ciepło właściwe powietrza przy stałej objętości,

T_0 – temperatura w budynku reaktora przed awarią.

Całkowanie układu równań (1),(2) pozwala na określenie dla dowolnego czasu t masy pary i całkowitej energii wewnętrznej mieszaniny parowo-powietrznej znajdującej się w budynku reaktora. Równowagową temperaturę mieszaniny przy założeniach przedstawionych wcześniej można określić na drodze iteracyjnej, posługując się poniższym algorytmem.

Energia wewnętrzna pary wynosi

$$U_s = U_m - U_a$$

gdzie U_a – energia wewnętrzna powietrza,

$$U_a = m_a c_{va} T$$

T – równowagowa temperatura mieszaniny parowo-powietrznej (dla pierwszego kroku iteracyjnego – wielkość założona).

Energia wewnętrzna właściwa i objętość właściwa pary wodnej wynoszą

$$u_s = \frac{U_s}{m_s}, \quad v_s = \frac{V}{m_s}$$

gdzie V jest objętością budynku reaktora.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej oraz jej temperatura mogą być określone z następujących zależności

$$p_s = f_1(u_s, v_s) \quad (3)$$

oraz

$$T = T_s = T_a = \begin{cases} f_2(p_s) & \text{dla pary nasyconej} \\ f_3(p_s, u_s + p_s v_s) & \text{dla pary przegrzanej} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie f_1 , f_2 i f_3 są znanymi funkcjami termodynamicznymi wynikającymi z równania stanu dla pary wodnej.

Ciśnienie powietrza wynosi:

$$p_a = \frac{m_a R_a T}{V} \quad (5)$$

gdzie R_a jest stałą gazową dla powietrza.

Ciśnienie całkowite w budynku reaktora

$$P = p_s + p_a$$

Wartość temperatury określona z zależności (4) podlega weryfikacji w kolejnych krokach iteracyjnych aż do uzyskania odpowiednio małej różnicy między wartością założoną a wyliczoną.

2. MODEL „TŁOKOWY”

Model „tłokowy” skonstruowany został przy następujących założeniach:

- powstająca w budynku para nie miesza się z powietrzem i tworzy rozprężający się „tłok” parowy,
- czoło „tłoka” parowego jest powierzchnią nieprzepuszczalną i adiabatyczną,
- nie uwzględnia się bezwładności „tłoka” parowego, a przemieszczanie się jego czoła zdeterminowane jest przez założenie o równości ciśnień w strefie parowej i powietrznej,
- para traktowana jest jak gaz rzeczywisty, a powietrze jak gaz doskonały.

Uwzględniając powyższe założenia oraz fakt iż energia dostarczana do układu w czasie od t_0 do t_1 określona równaniem (2) spowoduje wzrost energii wewnętrznej pary znajdującej się w układzie oraz wykonanie przez „tłok” pewnej pracy związanej ze sprężaniem powietrza, można napisać, że

$$\int_{t_0}^{t_1} G_b(t) h_b(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} G_b(t) u_s(t) dt + W$$

gdzie: u – chwilowa wartość energii wewnętrznej właściwej pary wodnej w „tłoku”,

W – praca sprężania powietrza w przedziale czasu $t_0 - t_1$.

Korzystając z założenia o adiabatyczności procesu sprężania powietrza, można napisać wyrażenie na pracę sprężania powietrza o objętości początkowej V_{a0} od ciśnienia p_{a0} do p_a :

$$W = \frac{p_{a0} V_{a0}}{\chi - 1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_{a0}} \right)^{\frac{\chi - 1}{\chi}} \right]$$

gdzie χ – wykładnik adiabaty dla powietrza.

Zależność powyższą można w prosty sposób wyprowadzić w oparciu o pierwszą zasadę termodynamiki, przy założeniu że układ nie wymienia ciepła z otoczeniem, a więc że praca zostanie wykonana wyłącznie kosztem spadku energii wewnętrznej czynnika. Dla przemiany adiabatycznej można też określić objętość powietrza o początkowym ciśnieniu p_{a0} i objętości V_{a0} po sprężeniu do ciśnienia p_a

$$V_a = V_{a0} \left(\frac{p_{a0}}{p_a} \right)^{\frac{1}{\chi}}$$

Założenie o niemieszaniu się pary z powietrzem pozwala na napisanie dwóch dodatkowych zależności

$$V_s = V - V_a$$

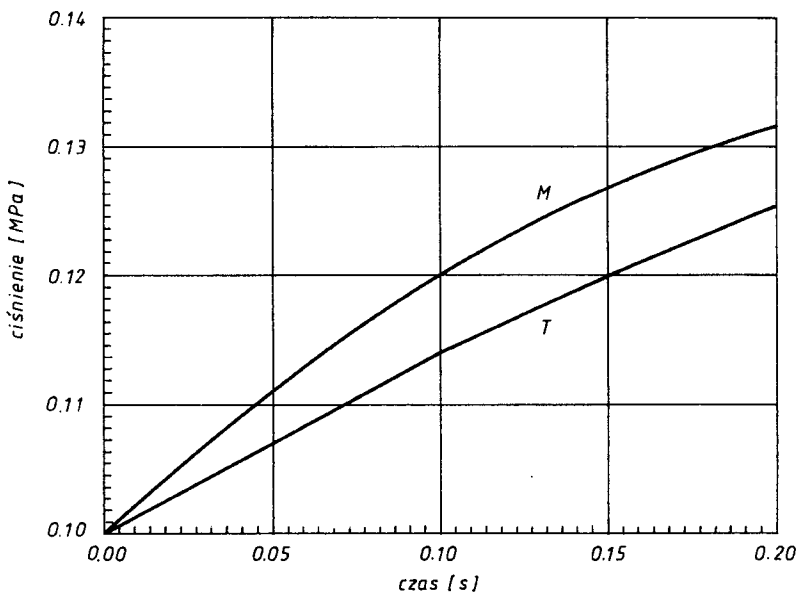
gdzie V_s i V_a są odpowiednio objętością pary („tłoka”) i objętością powietrza w budynku reaktora oraz

$$p = p_a = p_s$$

Uwzględniając powyższe zależności oraz równanie stanu dla powietrza (5) i pary wodnej (3), można na drodze iteracyjnej określić ciśnienie panujące w pomieszczeniu, a następnie jednoznacznie określić pozostałe parametry termodynamiczne obu czynników.

3. OBLICZENIA I ANALIZA WYNIKÓW

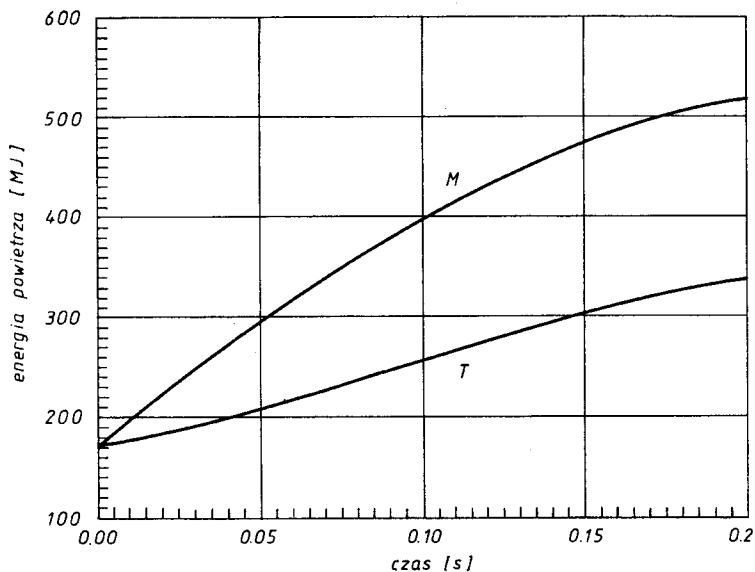
W celu rozwiązania układu równań (1), (2) zastosowano w obliczeniach metodę Rungego-Kutty czwartego rzędu z kontrolą błędu względnego na poziomie 10^{-4} oraz automatycznym doбором kroku całkowania. Równowagową temperaturę w modelu „natychmiastowego wymieszania” oraz ciśnienie w modelu „tłokowym” określano za pomocą metody siecznych. Oba procesy iteracyjne nie powodowały większych trudności numerycznych, przy czym pierwszy wykazywał znacznie lepszą zbieżność.



Rys. 2. Zmiana ciśnienia w budynku reaktora wg modelu „tłokowego” (T) i modelu „natychmiastowego wymieszania” (M)

Celem porównania modelu „natychmiastowego wymieszania” i modelu „tłokowego” przeprowadzono obliczenia dla zamkniętej objętości ($V = 10^4 \text{ m}^3$, $p_{a0} = 0,1 \text{ MPa}$, $T_0 = 293,15 \text{ K}$) oraz stałego w czasie masowego natężenia wypływu z reaktora ($W_b = 2 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $h_b = 1180 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). Obliczenia wykazały (rys. 2), że ciśnienie określone wg modelu „natychmiastowego wymieszania”, w interesującym nas przedziale czasu (tj. ok. 0,1 s), jest o ok. 0,006 MPa wyższe od ciśnienia określonego wg modelu „tłokowego”. Przyczyn tego zjawiska można dopatrywać się w zasadniczo różnym dla obu modeli sposobie wymiany energii między parą wodną a powietrzem. W modelu tłokowym para przekazuje energię do powietrza tylko przez wykonanie pracy sprężania, nie przekazuje natomiast ciepła (zgodnie z założeniem adiabatyczności powierzchni

„tłoka”). Obliczenia wykazały natomiast (rys. 3), że ilość energii przekazanej do powietrza w modelu „natychmiastowego wymieszania” jest znacznie większa (247,8 MJ w ciągu 0,1 s) niż praca sprężania powietrza obliczona na podstawie modelu „tłokowego” (94,7 MJ w ciągu 0,1 s). Model „natychmiastowego wymieszania” wprowadza dodatkowy „opór” dla rozprężającej się pary (jest nim rosnące cząstkowe ciśnienie powietrza).



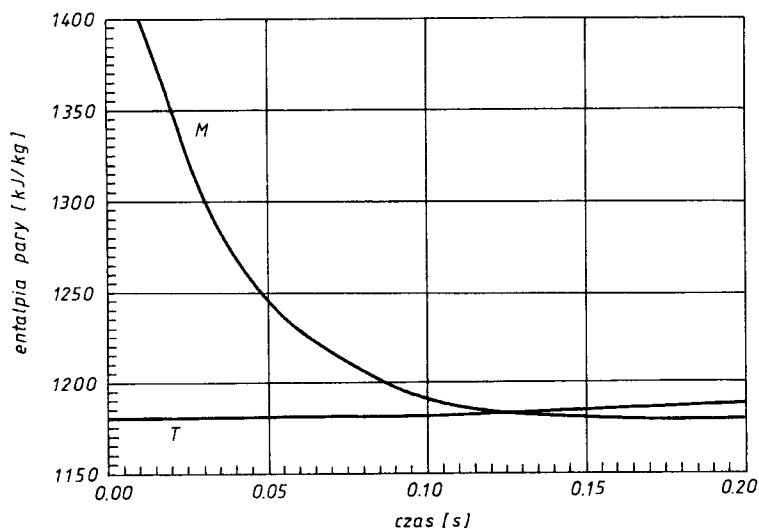
Rys. 3. Zmiana energii wewnętrznej powietrza w budynku reaktora wg modelu „tłokowego” (T) i modelu „natychmiastowego wymieszania” (M)

Z analizy przebiegu zmian entalpii pary (rys. 4) wynika, że proces rozprężania wg modelu „tłokowego” przebiega praktycznie po linii stałej entalpii, a stopień suchości pary nieznacznie przekracza wartość 0,3. W „tłoku” parowym mamy więc do czynienia z parą bardzo wilgotną. Faza ciekła „tłoka” kumuluje znaczną część energii wewnętrznej i działa hamująco na wzrost ciśnienia w jego wnętrzu.

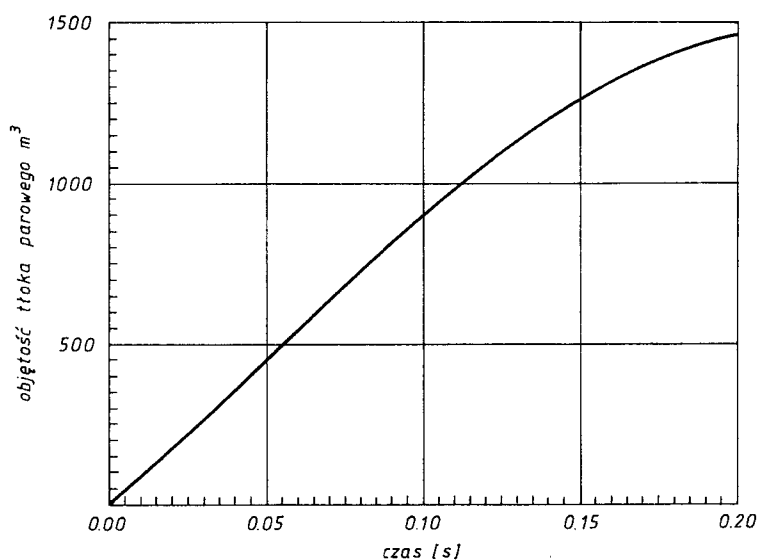
Analogiczne obliczenia przeprowadzono przy innych (również zmiennych w czasie) natężeniach wypływu chłodziwa z reaktora. Wyniki potwierdziły sformułowane powyżej wnioski.

Analiza wyników skłania do wyrażenia pewnych zastrzeżeń dotyczących założeń poczynionych przy formułowaniu modelu „tłokowego”. Model ten nie uwzględnia praktycznie żadnych zjawisk przepływowych związanych z przemieszczaniem się czoła „tłoka”. W efekcie braku bezwładności „tłok” zwiększa swą objętość z dużą prędkością (w początkowej fazie ok. $7,5 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), nie przechodząc praktycznie przez fazę „rozprężania” (rys. 5). Model „tłokowy” nie uwzględnia też faktu, iż zaburzenie ciśnienia nie przenosi się do całej strefy, w której znajduje się powietrze. W rzeczywistości sprężeniu ulega tylko

część powietrza otaczająca „tłok”, ale do większego ciśnienia niż to wynika z modelu. Inaczej mówiąc, praca sprężania nie powinna być przejmowana przez całą masę powietrza, a jedynie przez część otaczającą „tłok”. Wymienione tu zastrzeżenia można oczywiście przez rozbudowanie modelu znacznie osłabić, czy wręcz usunąć, tracąc jednak podstawową zaletę modelu, jaką są niskie koszty obliczeń.



Rys. 4. Zmiana entalpii pary w budynku reaktora wg modelu „tłokowego” (T) i modelu „nastychmiastowego wymieszania” (M)



Rys. 5. Zmiana objętości „tłoka” parowego

Wobec powyższych faktów, mając jednocześnie na uwadze niewielkie różnice w wartościach ciśnienia uzyskane z obu modeli oraz fakt, że model „natychmiastowego wymieszania” daje wyniki bardziej pesymistyczne, należy stwierdzić, że stosowanie modelu natychmiastowego wymieszania jest całkowicie uzasadnione.

LITERATURA

- [1] Cheng T. C., Metcalfe L. J., Hortman J. E, Mings W. J.: *CONTEMPT4/MOD3: a multi-compartment containment system analysis program* NUREG/CR-2558, 1982.
- [2] Preußer G.: *The multi-compartment code WAVCO* Kerntechnik 53(1), 1988, s. 47-52.
- [3] Urquizo C. L.: *Rechnungen zum Langzeitverhalten der Störfallatmosphäre im Sicherheits-einschluß eines Druckwasserreaktors mit dem Programmsystem ALFA2* Kernenergie 31(10), 1988, s. 429-433.

COMPARISON OF LIMITING MODELS OF STEAM PROPAGATION IN REACTOR CONTAINMENT DURING LOCA ACCIDENT

Summary

Two limiting models of the propagation of steam in the reactor building during loss of coolant accident are described. The results of computation with the „piston” and „instantaneous mixing” models are compared. An estimation of the utility of models in PWR safety analysis is presented.

СРАВНЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРА В ЗДАНИИ РЕАКТОРА ВО ВРЕМЯ АВАРИИ ТИПА LOCA

Краткое содержание

В работе представлены две крайних модели распространения водяного пара в здании реактора во время максимальной проектной аварии. Результаты полученных расчетов сравнены с помощью поршневой модели, а также моментального перемешивания. Оценена пригодность модели для анализа безопасности атомной энергетической установки с реакторами PWR.