

Stanisław Kasprzak

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

NAGRZEWANIE SIĘ KROPEL WODY OPADAJĄCYCH W OŚRODKU PAROWO-POWIETRZNYM

W pracy przedstawiono model matematyczny wymiany masy i ciepła dla kropeł wody opadających z prędkością swobodnego opadania w ośrodku parowo-powietrznym. Obliczenia przeprowadzono dla awaryjnych systemów zraszających pomieszczenia ochłodzonych wodą reaktorów jądrowych, których budowę przewiduje się w Polsce. W wyniku obliczeń określono wymiary kropeł, jakie powinny być wytwarzane w systemach zraszających.

WYKAZ OZNACZEŃ

- c_p - ciepło właściwe, $[kJ/(kg \cdot K)]$
 d - średnica kropli, $[m]$
 f - współczynnik oporu aerodynamicznego
 g - przyspieszenie ziemskie, $[m/s^2]$
 h - ciepło przemiany fazowej para-ciecz, $[kJ/kg]$
 k_g - współczynnik wnikania masy, $[kg/(m^2 \cdot s)]$
 Nu - liczba Nusselta
 Pr - liczba Prandtla
 $p(t)$ - ciśnienie cząstkowe pary wodnej jako funkcja temperatury w stanie nasycenia, $[Pa]$
 P_{igr} - średnie ciśnienie cząstkowe powietrza w warstwie granicznej na zewnątrz kropli, $[Pa]$
 q - strumień ciepła, $[kJ/(m^2 \cdot s)]$
 Re - liczba Reynoldsa
 r - bezwymiarowa współrzędna promieniowa
 Sc - liczba Schmidta

- Sh - liczba Scherwooda
 t - temperatura, [°C]
 u - prędkość swobodnego opadania, [m/s]

Litery greckie

- α - współczynnik wnikania ciepła, [W/(m²·K)]
 λ - współczynnik przewodzenia ciepła, [W/(m·K)]
 μ - dynamiczny współczynnik lepkości, [kg/(m·s)]
 ρ - gęstość, [kg/m³]
 τ - czas, [s]

Indeksy

- c - dotyczy strumienia ciepła przekazywanego konwekcyjnie
 g - w fazie gazowej
 l - w fazie ciekłej
 m - dotyczy strumienia ciepła otrzymanego w wyniku skroplenia pary
 0 - dotyczy temperatury początkowej kropli
 s - na powierzchni kropli
 śr - dotyczy temperatury średniej
 ∞ - w dużej odległości od powierzchni kropli

1. WPROWADZENIE

We współczesnych elektrowniach jądrowych z reaktorami wodno-ciąnieniowymi (PWR) stosuje się systemy zraszające, które w przypadku awaryjnego rozszczelnienia obiegu pierwotnego reaktora powinny efektywnie usuwać z atmosfery pomieszczenia ("containmentu") ciepło i substancje radioaktywne. Przy projektowaniu takich urządzeń, dla osiągnięcia ich wysokiej wydajności, konieczne jest określenie szybkości nagrzewania się kropeł wody opadających w ośrodku parowo-powietrznym. Zagadnieniu temu poświęcona jest niniejsza praca. Przedstawiono w niej model matematyczny jednoczesnej wymiany ciepła i masy dla swobodnie opadających kropeł oraz wyniki obliczeń szybkości nagrzewania się kropeł dla systemów zraszających pomieszczenia 3 typów reaktorów.

2. MODEL ZJAWISKA

Analizuje się wymianę ciepła i masy dla pojedynczej kropli wody opadającej swobodnie w nieograniczonej wymiarowo przestrzeni, wypełnionej nasyconą mieszaniną parowo-powietrzną. Temperatura początkowa kropli t_0 jest znacznie niższa niż temperatura mieszaniny t_∞ . W tych warunkach w otoczeniu kropli występuje, skierowany do jej powierzchni, transport ciepła i masy (pary wodnej). Na powierzchni kropli para wodna skrapla się, oddając ciepło przemiany fazowej. Ciepło przekazane do powierzchni kropli transportowane jest następnie w jej głąb, powodując stopniowe podwyższanie się średniej temperatury kropli. W opisie zjawiska przyjęto następujące założenia:

1. Analizuje się krople o wymiarach praktycznie stosowanych w systemach zraszających, tj. o średnicach $0,5-4 \cdot 10^{-3}$ m.

2. Pomija się wzajemne oddziaływanie opadających kropeł ze względu na duże średnie odległości między kroplami, większe od $37 d$ (przy stosowanych natężeniach zraszania $0,1-0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

3. Od początku procesu kropla opada z prędkością swobodnego opadania. W rzeczywistości, w początkowym okresie, prędkość kropli jest równa prędkości wylotu strug z dysz, która jest większa od prędkości swobodnego opadania. Prędkość małych kropeł szybko obniża się do prędkości swobodnego opadania, natomiast dla kropeł największych ($4 \cdot 10^{-3}$ m) założenie to jest gorzej spełnione; krople takie osiągają prędkość swobodnego opadania po $\sim 0,3$ s, tj. po przebyciu ~ 4 m.

4. Warstwa graniczna wokół kropli jest w pełni rozwinięta już od momentu ukształtowania się kropli.

5. Pomija się wzrost średnicy kropli w wyniku skraplania pary. Jak wynika z bilansu ciepła, w analizowanych warunkach można liczyć się ze wzrostem średnicy co najwyżej o $\sim 6\%$.

6. Skład i temperatura mieszaniny parowo-powietrznej podczas opadania kropli są stałe w przestrzeni i w czasie.

7. Kroplę traktuje się jako kulę sztywną. Założenie to przyjęto w wyniku analizy prac B. P. L e C l a i r a i współpracowników [1] oraz J. N. C h u n g a i S. A y y a s w a m y [2]. Jak wynika z pracy [1] dla analizowanego zakresu średnic kropeł ($80 < Re < 3200$) nie istnieje spójna teoria pozwalająca na wystarczająco dokładne określenie pola prędkości wewnątrz kropli. Spowodowane to jest zwiększającą się wraz ze wzrostem średnicy kropli deformacją jej kształtu, wzrostem oscylacji oraz zwiększającym się wpływem wirów (począwszy od liczby $Re > 400$) pojawiających w fazie ciągłej za kroplą. Porównanie określonej eksperymentalnie prędkości na powierzchni kropli (na równoleżniku określonym kątem 75° między kierunkiem ruchu a promieniem) z prędkościami określonymi teoretycznie (cztery modele), dla średnic $d > 1$ wykazuje rozbieżności sięgające kilkuset procent. Model przepływu potencjalnego na zewnątrz kropli oraz płynu nielepkiego wewnątrz, użyty w pracy [2] do określenia prędkości cyrkulacji, daje wyniki przewyższające o dwa rzędy wartości określone eksperymentalnie. Użycie tego modelu do obliczeń musi powodować nadmierną intensyfikację procesu wymiany ciepła i masy, szczególnie w początkowym okresie istnienia kropli. W świetle przytoczonych wyżej wyników badań cyrkulacji w opadającej kropli można sądzić, że do obliczeń analizowanego procesu, w odniesieniu do awaryjnych systemów zraszających, najbardziej uzasadnione jest użycie "bezpiecznego" modelu, traktującego kroplę jako kulę sztywną.

Przy powyższych założeniach, nagrzewanie się kropeł opadających w ośrodku parowo-powietrznym opisuje równanie nieustalonego przewodzenia w objętości kropli

$$\rho_l c_{pl} \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\lambda_l}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial t}{\partial \theta} \right), \quad (1)$$

z następującymi warunkami początkowymi i brzegowymi

$$\text{dla } \vartheta = 0^-, \text{ dla wszystkich } r, t = t_0, \quad (2)$$

$$\vartheta \geq 0^+, \text{ dla } r = 0 \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\text{dla } r = 1 \quad -\lambda_1 \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right|_s = q_c + q_m, \quad (4)$$

gdzie strumień ciepła q_0 opisano zależnością

$$q_0 = \alpha(t_\infty - t_s) \quad (5)$$

oraz strumień ciepła powstający w wyniku skraplania pary q_m zależnością

$$q_m = k_g h \frac{p(t_\infty) - p(t_s)}{p_{1s} r}. \quad (6)$$

Współczynnik wnikania ciepła α w równaniu (5) wyznaczono z zależności Frösslinga [3]

$$Nu = 2 + 0,552 Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (7)$$

oraz współczynnik wnikania masy k_g w równaniu (6), z zależności analogicznej do (7)

$$Sh = 2 + 0,552 Re^{0,5} Sc^{0,33}. \quad (8)$$

Prędkość swobodnego opadania określano z zależności

$$u = 0,153 \frac{d^{1,142} (\rho_l - \rho_g)^{0,714} g^{0,714}}{\mu_g^{0,428} \rho_g^{0,286}}, \quad (9)$$

dla $0,4 < Re < 1000$

lub

$$u = 1,74 \sqrt{\frac{d(\rho_l - \rho_g) g}{\rho_g}}, \quad (10)$$

dla $Re > 1000$.

Zależność (9) otrzymuje się przyjmując, że współczynnik oporu aerodynamicznego $f = 18,5 Re^{-0,6}$ (dla ruchu o charakterze przejściowym), natomiast zależność (10) w wyniku przyjęcia $f = 0,44$ (dla ruchu burzliwego).

Sformułowane wyżej zagadnienie rozwiązano numerycznie metodą różnic skończonych, stosując schemat Crank-Nicholsona [5].

Występujące w zależności (6) ciśnienia cząstkowe pary wodnej w funkcji temperatury, wyznaczano z wielomianu ósmego stopnia zaproponowanego przez J.H. Keenan i współautorów [4].

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano dla elektrowni jądrowych z reaktorami WWER-440 i WWER-1000, których budowę przewiduje się w Polsce, oraz dla stanowiska badawczo-modelowego reaktora "Maria". Obliczenia wykonano dla warunków, jakie zaistniałyby podczas zraszania pomieszczeń reaktorów po awarii polegającej na dwustronnym zerwaniu rurociągu obiegu pierwotnego. Jako dane do obliczeń (podane w tabelicy 1) przyjęto wielkości parametrów termodynamicznych panujących w poszczególnych pomieszczeniach.

T a b l i c a 1

Warunki panujące w pomieszczeniach reaktorów
w chwili uruchomienia systemu zraszania *)

Lp.		Ciśnienie Pa	Temperatura °C	Udział masowy pary wodnej	Droga opada- nia kropeł m
1	Elektrownia jądrowa WWER-4400	$2,1 \cdot 10^5$	120	0,91	20
2	Elektrownia jądrowa WWER-1000	$4,0 \cdot 10^5$	130	0,56	40
3	Stanowisko badawczo-mode- lowe reaktora "Maria"	$1,2 \cdot 10^5$	75	0,23	6

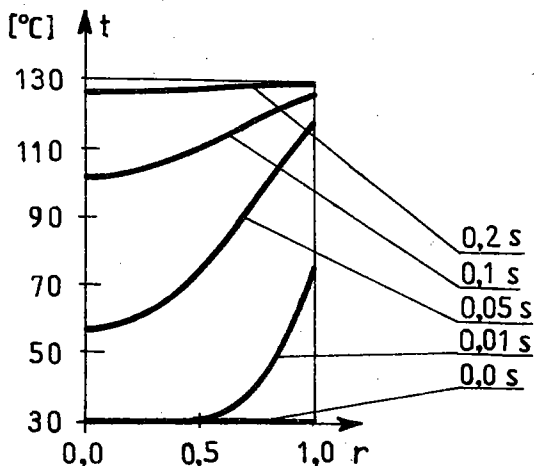
*) Parametry obliczone w Zakładzie Siłowni i Reaktorów Jądrowych ITC PW [6], [7].

W każdym z 3 przypadków obliczenia wykonano dla kropli o temperaturze początkowej $t_0 = 30^\circ\text{C}$, tj. dla średniej temperatury wody w zbiornikach magazynujących.

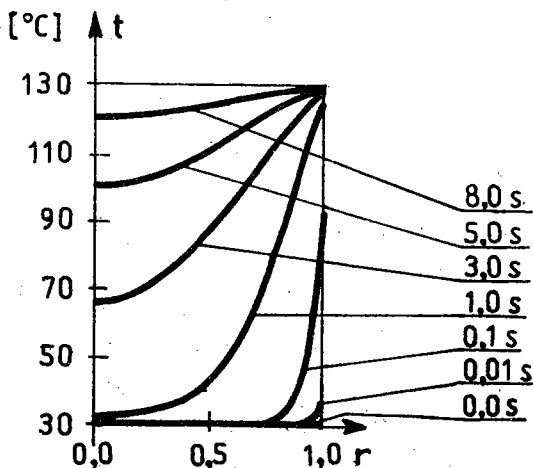
Na rys.1 przedstawiono przykład rozkładów temperatury w funkcji czasu dla kropli o najmniejszej i największej z analizowanych średnic dla takich samych warunków zewnętrznych.

Na rys.2a, b, c przedstawiono krzywe ilustrujące zmianę średniej temperatury kropli w funkcji czasu opadania. Na krzywych odnoszących się do większych rozmiarów kropli zaznaczono strzałką chwilę, w której krople przestają istnieć, osiagając poziom posadzki pomieszczenia. Z wyników obliczeń można określić wymiary kropli, jakie powinny być wytwarzane przez systemy zraszania, dla zapewnienia ich wysokiej efektywności. Zakładając, że efektywność systemu zraszającego $\epsilon = (t_{gr} - t_0) / (t_\infty - t_0)$ winna wynosić $\epsilon > 0,95$, otrzymuje się dla poszczególnych rozwiązań następujące wymiary kropli

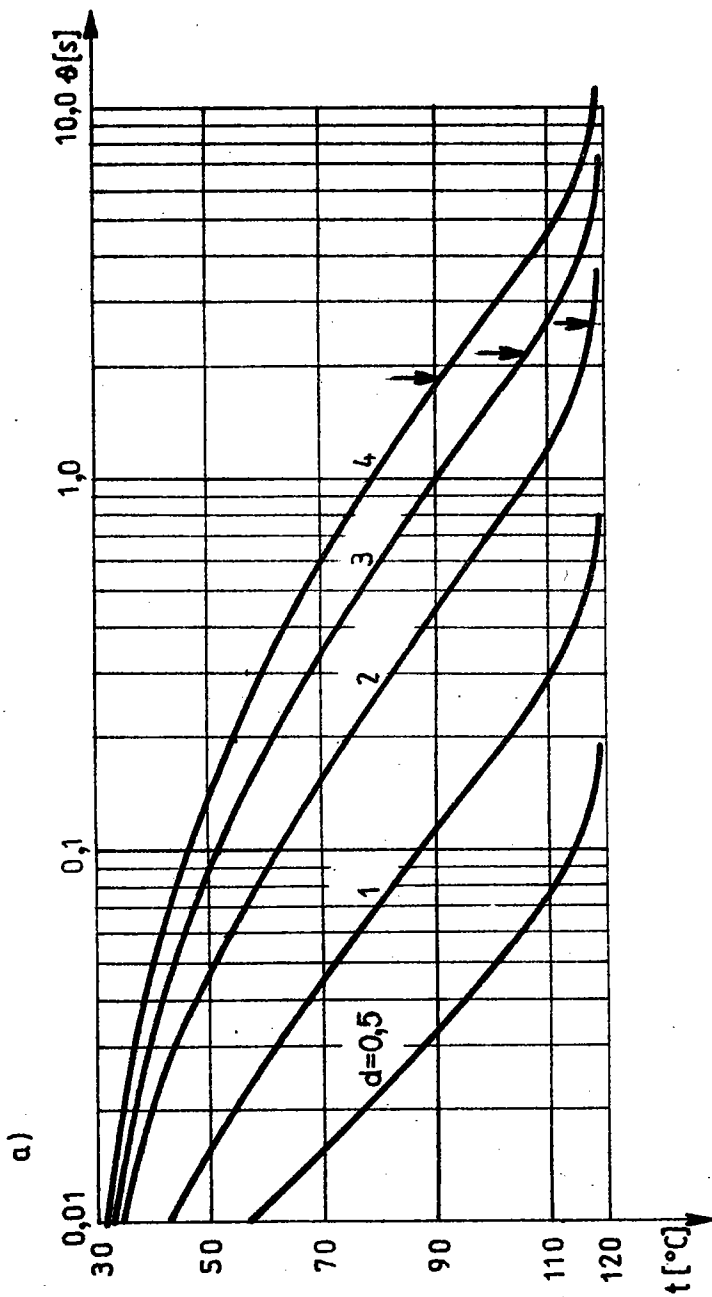
a)



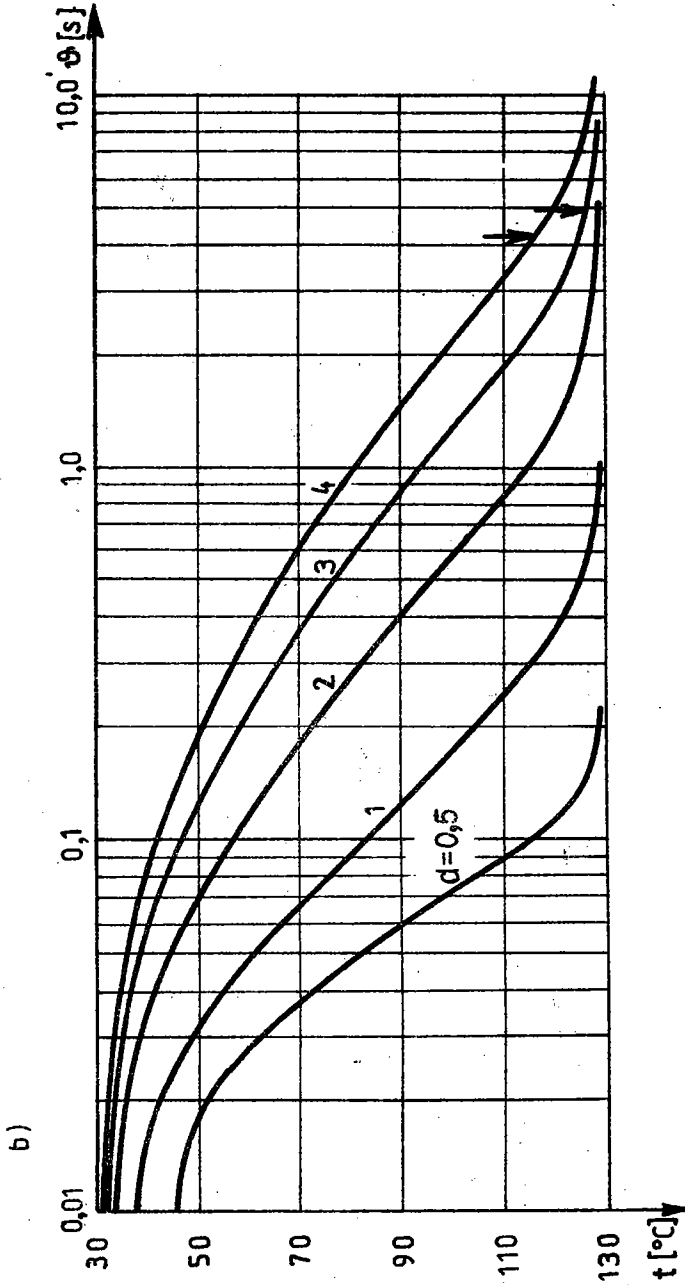
b)



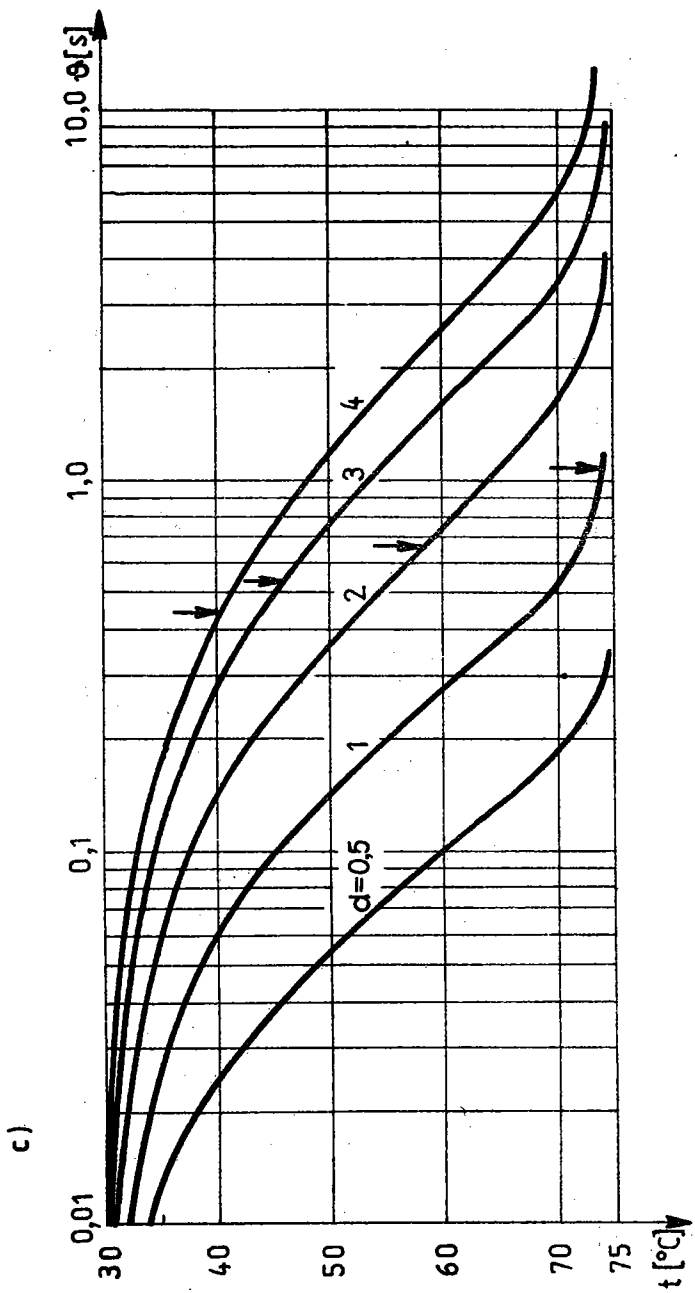
Rys.1. Rozkłady temperatury wewnątrz kropli w funkcji czasu dla kropli o średnicy $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ m (a) i $d = 4 \cdot 10^{-3}$ m (b), opadających w warunkach dla WWR-1000 (tabl.1)



Rys. 2. Zależność średniej temperatury kropli od czasu i średnicy kropli. Strzałką zaznaczono chwilę osiągnięcia przez kroplę posadzki pomieszczenia: a) dla elektrowni z reaktorem WWR-440



Rys.2. b) dla elektrowni z reaktorem WWER-1000



Rys.2. c) dla stanowiska badawczo-modelowego reaktora "Maria"

WWER - 1000	$d \approx 3 \cdot 10^{-3}$ m,
WWER - 440	$d \approx 2 \cdot 10^{-3}$ m,
Stanowisko badaw- czo-modelowe reakt. "Maria"	$d \approx 1 \cdot 10^{-3}$ m.

4. WNIOSKI

Przedstawiono model matematyczny umożliwiającą analizę efektywności awaryjnych systemów zraszających pomieszczenia reaktorów jądrowych. Model umożliwia wyznaczenie optymalnych średnio początkowych kropel, w zależności od warunków panujących w pomieszczeniu i jego wysokości. Ze względu na przyjęte założenia proponowany model matematyczny daje "bezpieczne" wyniki obliczeń. Podano wyniki obliczeń dla elektrowni z reaktorami WWER-440 i WWER-1000 oraz dla stanowiska badawczo-modelowego reaktora "Maria" w IBJ.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Le Clair B.P., Hamielec A.E., Prupacher H.R., Hall W.D.: A Theoretical and Experimental Study of the Internal Circulation in Water Drops Falling at Terminal Velocity in Air, Journal of the Atmospheric Sciences, vol.29, nr 4, May 1972.
- [2] Chung J.N., Aiyaswamy S.: The Effect of Internal Circulation on the Heat Transfer of a Nuclear Reactor Containment Spray Droplet. Nuclear Technology, vol. 35, October 1977.
- [3] H ob l e r T.: Dyfuzyjny ruch masy i absorberzy. WNT, Warszawa 1976.
- [4] Keenan J.H., Keyes F.G., Hill P.G., Moore J.G.: Steam Tables, John Wiley and Sons Inc. 1969.
- [5] Potter D.: Metody obliczeniowe fizyki. PWN, Warszawa 1982.
- [6] Ocena wpływu układów ograniczających skutki awarii, spowodowanej zerwaniem głównego rurociągu obłogu pierwotnego, na parametry cieplne oraz koncentrację produktów roz-

szczęplenia w budynku reaktora WWR-440 z wodnymi kondensatorami pary, w oparciu o badania eksperymentalne. Opracowanie wykonane na zlecenie GBSiPE "Energoprojekt" - listopad 1981.

- [7] Wstępny raport bezpieczeństwa - obliczenia i analizy. Opracowanie wykonane na zlecenie GBSiPE "Energoprojekt" - listopad 1981.

НАГРЕВАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ, ПАДАЮЩИХ В ПАРО-ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе приводится математическая модель массо- и теплообмена для капель воды, движущихся со скоростью свободного падения в паро-воздушной среде. Вычисления проводятся для аварийных систем, орошающих помещения, в которых устанавливаются охлаждаемые водой ядерные реакторы, строительство которых предусматривается в ПНР. В результате проведенных вычислений были определены размеры капель, образующихся в орошающих системах.

THE HEATING OF THE WATER DROPS FALLING IN AIR-STEAM ATMOSPHERE

S u m m a r y

In the paper the mathematical model of the mass and heat transfer for water drops free falling in a air-steam atmosphere is presented. The calculations were made for the systems spraying the containments of the water-cooled nuclear reactors, which are going to be build in Poland. As a result of the calculations the drop diameters which should be created by the spraying systems have been estimated.

Manuskrypt dostarczony w październiku 1983 r.