

Piotr KUBSKI

Katedra Techniki Ciepłej
Politechnika GdańskaWPŁYW STRUMIENIA CIEPŁA
NA GĘSTOŚĆ STRUMIENIA MASY SEPARUJĄCYCH SIĘ KROPEL

Streszczenie: Opierając się na modelu bezwładnościowym procesu separacji kropeł z przepływem dwufazowym, w warunkach ich odparowywania, wyprowadzono zależność analityczną na gęstość strumienia masy separujących się kropeł. Przedyskutowano wpływ niektórych czynników na gęstość strumienia masy separujących się kropeł.

Spis oznaczeń:

- | | |
|---|-------------------------------------|
| a - promień kropli, | e - droga hamowania kropli, |
| $B = K \cdot Pr_f^{-2/3}$ - parametr odparowania, | t - temperatura, |
| C - opór dyfuzji, | v_0 - prędkość dynamiczna, |
| c_p - ciepło właściwe, | y - współrzędna odniesienia, |
| g - funkcja rozkładu masy, | δ - odległość, |
| $K = \frac{r}{c_p \cdot f \cdot \Delta t}$ - liczba zmiany fazowej, | ε - dyfuzyjność pędu, |
| m - gęstość strumienia masy, | κ - stała turbulencji, |
| p - funkcja rozkładu statystycznego, | g - gęstość, |
| r - ciepło parowania, | φ - stosunek masowy, |
| Pr - liczba Prandtla, | ν - kin. współczynnik lepkości. |

Indeksy dotyczą:

- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| + - wielkości bezwymiarowej, | max - wartości maksymalnej, |
| d - dolnej granicy, | min - wartości minimalnej, |
| g - górnej granicy, | o - braku odparowania, |
| i - warstwy inercyjnej, | t - warstwy turbulენტnej, |
| l - cieczy, | v - odparowania. |
| f - gazu (pary), | |

1. Wstęp

Ważnym z punktu widzenia wiedzy inżynierskiej i aktualnym problemem badawczym jest zjawisko penetracji kropeł w przepływie dwufazowym. Występuje ono podczas np. przepływu pary mokrej przez kanały turbin parowych. Spotykamy je również w kanałach, w których zachodzi proces wrzenia i generacji pary. Zjawisko to zachodzi ponadto w procesie mieszania gorącego gazu z rozdrobnioną fazą ciekłą wody. W powyższych procesach krople wyseparowują się z przepływu i osiadają na ścianach kanałów lub urządzeń, przy czym ilość wyseparowanej wody wpływa na przebieg tych procesów.

Poruszające się krople posiadają swoją bezwładność zależną od rozmiarów kropli. Bezwładność ta wpływa na ruch kropeł powodując, że nie pokrywa się on z polem prędkości fazy gazowej. Stąd też obecnie powszechnie przyjmuje się, że o ruchu kropeł względem fazy gazowej decyduje głównie mechanizm turbulento-bezwładnościowy.

Istotnym elementem opisu ruchu kropli w procesie separacji jest wg pracy [1] droga hamowania kropeł. W pracy [2] sformułowano analityczny opis ruchu kropli, na podstawie którego wyznaczono drogę hamowania pojedynczej kropli przy jej jednoczesnym odparowywaniu. Znajomość drogi hamowania jest nieodzowna przy wyznaczaniu dyfuzyjności pędu dla odparowującej kropli. W pracy [3] podano model bezwładnościowy dla procesu separacji odparowujących kropeł. Model ten opiera się na pojęciu skali ruchu bezwładnościowego, za którą uznano drogę hamowania kropli po otrzymaniu impulsu. Idea modelu sprowadza się do wzajemnego powiązania drogi mieszania i hamowania kropli. Otóż, jeśli wiry turbulენტne są dostatecznie duże, a ma to miejsce w dużej odległości od powierzchni ograniczającej przepływ, to odparowująca kropla może nadążyć za ruchem wewnątrz takiego wiru. Jeśli natomiast wiry są małe w porównaniu z drogą hamowania kropli odparowującej, to kropla będzie je ignorować, podobnie jak molekularne ruchy ośrodka, i będzie się przemieszczać na odległość drogi hamowania. Po przebyciu drogi hamowania, odparowująca kropla może otrzymać następny impuls wynikający z fluktuacji prędkości ośrodka.

W pracy [3] dla przyjętego modelu wyznaczono ponadto granice warstwy inercyjnej, w której występuje mechanizm bezwładnościowy w procesie separacji. Określono także dla warstwy inercyjnej dyfuzyjność pędu odparowujących kropeł oraz wyznaczono minimalną wielkość kropli pokonującej ruchem bezwładnościowym podwarstwę laminarną. Znajomość powyższych wielkości charakteryzujących mechanizm bezwładnościowy w procesie separacji może być podstawą wyznaczenia strumienia masy separujących się kropeł w polu temperatury.

Celem niniejszej pracy jest zatem, dla przyjętego modelu separacji podczas przepływu dwufazowego, określenie analityczne wpływu strumienia ciepła na strumień masy separujących się kropeł na powierzchnię ograniczającą przepływ.

2. Strumień masy kropeł separujących się z przepływu dwufazowego

Gęstość strumienia masy kropeł określa zależność:

$$m = \varepsilon_1 \frac{\partial c}{\partial y} \quad (1)$$

Ponieważ w procesie separacji kropeł w przepływie istotne znaczenie ma średnica kropeł, więc zal. (1) wobec $m = m(a)$, może być przedstawiona w postaci:

$$dm(a) = \varepsilon_1 \frac{\partial^2 c(a)}{\partial y \partial a} da \quad (2)$$

Uwzględniając rozkład statystyczny kropeł $p(a)$ w przepływie, wprowadzając stosunek $\varphi(a)$ masy kropeł o średnicy $a \pm da$ do ogólnej masy kropeł:

$$\varphi(a) = \frac{dm(a)}{m da} = \frac{a^3 p(a)}{\int_0^\infty a^3 p(a) da}$$

oraz wprowadzając wielkości bezwymiarowe:

$$\begin{aligned} y^+ &= y \frac{v_0}{v_f}, & a^+ &= a \frac{v_0}{v_f}, & m^+ &= \frac{m}{v_0 \rho_f}, \\ \varepsilon^+ &= \frac{\varepsilon}{v_f}, & \varphi^+ &= \varphi \frac{v_f}{v_0}, & c^+ &= \frac{c}{\rho_f} \end{aligned}$$

zal. (2) można zapisać jako:

$$dm^+ = \varepsilon^+ \varphi^+ \frac{\partial c^+}{\partial y^+} da^+ \quad (3)$$

By określić gęstość strumienia masy kropeł m_w osiadających na powierzchni ograniczającej przepływ, w warunkach odparowywania kropeł, przyjeto:

$$dm^+ = g(y^+) dm_w^+$$

wprowadzając funkcję $g(y^+)$ rozkładu separującego się strumienia wzdłuż współrzędnej y (prostopadłej do powierzchni), z zal. (3) otrzymano wówczas:

$$dm_w^+ = \frac{\varepsilon^+ \varphi^+(a^+)}{g(y^+)} \frac{\partial c^+}{\partial y^+} da^+ \quad (4)$$

Szczytkujemy związek (4) najpierw w granicach warstwy inercyjnej $[\delta_{1d}^+, \delta_{1g}^+]$, dla której dyfuzyjność pędu określona jest jako:

$$\varepsilon_{1,v}^+ = (s_v^+)^2 \frac{1}{\kappa y^+} \quad (5)$$

a następnie w granicach warstwy turbulენტnej $[\delta_{1g}^+, \delta^+]$, dla której

$$\varepsilon_1^+ = \kappa y^+ \quad (6)$$

przy warunkach brzegowych:

$$\begin{aligned} \text{dla } y^+ &= \delta_{1d}^+, & c^+ &= 0, \\ y^+ &= \delta^+, & c^+ &= c_\infty^+. \end{aligned}$$

Otrzymujemy wówczas gęstość strumienia masy kropeł separujących się na powierzchni ograniczającej przepływ, przy uwzględnieniu odparowywania

kropel

$$\frac{m_{w,v}}{v_0 S_f} = c_{\infty}^+ \int_{d_{\min,v}^+}^{d_{\max}^+} \frac{\varphi^+(a^+) da^+}{\int_{\delta_{id}^+}^{\delta_{ig}^+} \frac{g(y^+) dy^+}{\varepsilon_{l,v}^+(y^+, a^*)} + \int_{\delta_{ig}^+}^{\delta^+} \frac{g(y^+) dy^+}{\varepsilon_l^+(y^*)}} \quad (7)$$

Związki (5) i (6) zostały określone w pracy [3], tam również podano minimalny promień $a_{\min,v}$ kropeli i jej drogę hamowania s_v .

Jak wykazują obliczenia szczegółowe, całkując zamiast do a_{\max} , do wartości $+\infty$, popełnia się tylko niewielki błąd w wartości całki (7).

W celu dalszego uproszczenia obliczeń można przyjąć, że mianownik zal.(7) obliczany jest dla średniej średnicy kropel. Ponadto dla uproszczenia zapisu wprowadzono oznaczenia dla oporów dyfuzji warstwy bezwładnościowej C_i oraz turbulentnej C_t :

$$C_i = \int_{\delta_{id}^+}^{\delta_{ig}^+} \frac{g(y^+) dy^+}{\varepsilon_{l,o}^+(y^+, \bar{a}^*)}, \quad C_t = \int_{\delta_{ig}^+}^{\delta^+} \frac{g(y^+) dy^+}{\varepsilon_l^+(y^*)}$$

Oznaczając przez

$$\Delta m_{w,v} = m_{w,o} - m_{w,v}$$

różnicę gęstości strumienia masy separujących się kropel w warunkach bez odparowywania i z odparowywaniem ostatecznie otrzymuje się zależność:

$$\frac{\Delta m_{w,v}}{m_{w,o}} = \frac{B(2-B) \frac{C_i}{C_t}}{\frac{C_i}{C_t} + (1-B)^2}, \quad (8)$$

określającą wpływ odparowywania kropel na ich separację na powierzchni ograniczającej przepływ.

W tabelicy 1 dla wybranych wartości parametru odparowania B i dla dowolnie przyjętego stosunku oporów dyfuzji obu warstw zestawiono wartości stosunku gęstości strumieni masy $\Delta m_{w,v} / m_{w,o}$, będącego miarą wpływu strumienia ciepła na proces separacji. Wpływ ten, przy umiarkowanych wartościach parametru odparowania B i stosunku oporów dyfuzji C_i / C_t można oszacować na kilka do kilkunastu procent. A zatem strumień cieplny na powierzchni ograniczającej przepływ powoduje zauważalny spadek gęstości strumienia masy separujących się kropel.

Tablica 1. Wartości stosunku $\Delta m_{w,v} / m_{w,o}$, wg zal. (8), określającego wpływ strumienia ciepła na proces separacji kropeł.

B	$\frac{C_i}{C_t}$			
	0,1	0,2	0,3	0,5
0,05	0,010	0,017	0,024	0,035
0,10	0,021	0,038	0,051	0,072
0,15	0,034	0,060	0,081	0,114
0,20	0,049	0,086	0,115	0,158

Literatura :

- [1] J. Mikielawicz: - Dyfuzyjno- bezwładnościowy model separacji kropeł z przepływem dwufazowego.
Zeszyty Naukowe IMP PAN, Gdańsk, Nr 117 / 1019 / 81 .
- [2] P. Kubski: - Wpływ pola temperatury na drogę hamowania kropeł
Referaty Sympozjum Wymiany Ciepła, s. 167 - 172, Warszawa - Jabłonna 1983 .
- [3] P. Kubski: - Wpływ strumienia ciepła na dyfuzyjność pędu kropli w bezwładnościowym modelu separacji.
Materiały Zjazdu Termodynamików, Rytyro 1984 .

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА МАССОВУЮ
СКОРОСТЬ СЕПАРИРУЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ

Р е з ю м е

Базируя на инертном модели сепарации капель с двухфазного потока, в условиях их отпаривания, выведено аналитические уравнение на массовую скорость сепарирующихся капель. Доказано, что подгревание стены канала двухфазного потока значительно уменьшает массовую скорость сепарирующихся капель на стене канала.

THE EFFECT OF HEAT FLUX
ON THE MASS FLUX OF SEPARATING DROPLETS

S u m m a r y

Basing on the inertial model for evaporating droplets in two-phase flow the analytical relation of mass flux of the separating droplets has been derived. In the paper it has also been proved that flow limiting surface the heat flux causes a perceptible decrease of the mass flux of separating droplets.