

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

79

WARSZAWA - POZNAŃ 1980
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA — EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERZYCH · WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ROMUALD PUZYREWSKI
KAZIMIERZ STELLER (PRZEWODNICZĄCY — CHAIRMAN) · ROBERT SZEWAŁSKI
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN

ul. Gen. Józefa Fiszersa 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1980

Printed in Poland

ISBN 83-01-02691-X

ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Wydanie I. Nakład 370+90 egz. Ark. wyd. 11. Ark. druk. 8,25. Papier sat. kl. V, 70 g,
70×100. Oddano do składowania 2 I 1980 r. Podpisano do druku w listopadzie 1980 r. Druk
ukończono w listopadzie 1980 r. Zam. nr 343/20, T-6/506.

Cena zł 40.—

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

MARIAN TRELA, JANUSZ KOWALSKI

Gdańsk

Badania wymiany ciepła i masy podczas laminarnego opływu płyty powietrzem mgłowym*

W pracy rozwinięto przedstawiony w [1] model wymiany ciepła i masy podczas opływu płyty powietrzem mgłowym, a następnie skonfrontowano go z wynikami badań eksperymentalnych, uzyskując dobrą zgodność.

Oznaczenia

a — dyfuzyjność cieplna,
 C_p — ciepło właściwe,
 E_c, E_t, E_v — współczynniki intensyfikacji zdefiniowane w tekście,
 g — strumień Reynoldsa,
 k — przewodność cieplna, współczynnik proporcjonalności,
 Le — liczba Lewisa,
 $\dot{m}$ — masowe natężenie przepływu,
 $\dot{m}''$ — gęstość strumienia masy,
 r — ciepło parowania (kondensacji),
 u — prędkość wzdłużna,
 $\bar{v}$ — średnia prędkość poprzeczna w warstwie przyściennej,
 t — temperatura,
 q — gęstość strumienia cieplnego,
 α — współczynnik wymiany ciepła, masy,
 δ — grubość warstwy przyściennej,

ρ — gęstość,
 x — zawartość wilgoci w powietrzu mgłowym,
 Y — współrzędna prostopadła do płyty.

Indeksy dotyczą:

c — konwekcji,
 $c0$ — konwekcji bez kropelek,
 cr — warunków krytycznych,
 d — separacji kropelek,
 g — powietrza,
 $g0$ — powietrza suchego,
 l — cieczy, filmu,
 sep — separacji,
 w — ścianki,
 v — pary odparowania,
 vap — odparowania filmu,
 ∞ — strumienia swobodnego.

1. Wstęp

Przy opływie płyty powietrzem mgłowym następuje separacja kropelek wody na płytę. Zależnie od gęstości strumienia separujących się kropelek oraz gęstości strumienia cieplnego przyłożonego do płyty, na płycie zaobserwować można fazę ciekłą w postaci drobnych kropelek wody albo w postaci filmu zwilżającego całą powierzchnię.

* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR. I. 26: „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”, grupa tematyczna 01.

Wymiana ciepła i masy płyty pokrytej filmem wodnym analizowana była w [1], gdzie zaproponowano prosty model tego zjawiska. Porównanie wartości teoretycznych gęstości strumienia ciepłego obliczonych na podstawie tego modelu z nielicznymi wówczas eksperymentami [2], dało zadowalające rezultaty, co zachęciło do dalszych prac w tym kierunku.

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych współczynników wymiany ciepła i masy przy opływie płyty powietrzem mgłowym, na tle ich wartości teoretycznych, wynikających z rozpatrywanego modelu zjawiska.

2. Opis modelu

Założenia przedstawionego w pracy [1] modelu wymiany ciepła i masy między całkowicie zwilżoną płytą a powietrzem mgłowym są następujące:

- 1) przepływ filmu wodnego na płycie jest laminarny,
- 2) przepływ w dwufazowej warstwie przyściennej powietrza nad filmem jest laminarny,
- 3) temperatury powietrza i kropelek są w przybliżeniu równe w strumieniu swobodnym,
- 4) temperatura płyty jest stała i wyższa od temperatury powietrza w strumieniu swobodnym
- 5) opór cieplny filmu wodnego jest pomijalnie mały,
- 6) wpływ poprzecznych strumieni mas, separujących się kropelek wody oraz pary wodnej, na profil prędkości w warstwie przyściennej powietrza można pominąć.

Na podstawie powyższych założeń otrzymuje się z równań bilansowych masy i energii filmu wodnego związek określający gęstość strumienia ciepłego na płycie [1]:

$$q_w = q_c + q_{\text{vap}}, \quad (2.1)$$

gdzie q_c — gęstość strumienia ciepłego wynikająca z konwekcji i przewodzenia, q_{vap} — gęstość strumienia ciepłego wynikająca z parowania filmu wodnego.

Gęstość strumienia q_c jest większa niż dla klasycznego przypadku opływu płyty powietrzem suchym, z uwagi na intensyfikujące działanie kropelek wody przenikających do warstwy przyściennej powietrza. Intensyfikujące działanie kropelek polega na pobieraniu ciepła z warstwy przyściennej powietrza, a tym samym na zwiększaniu gradientu temperatury w tej warstwie. Kropelki te stanowią więc upusty ciepła dla warstwy przyściennej.

W przypadku płyty omywanej stycznie powietrzem mgłowym, czas przechodzenia kropelek przez warstwę przyścienną jest stosunkowo długi z uwagi na niewielkie siły działające na kropelki w kierunku prostopadłym do płyty, w związku z czym można założyć, iż kropelki będą w każdej chwili w równowadze termicznej z otoczeniem. Wynikająca stąd wartość gęstości strumienia ciepłego pobranego przez kropelki podczas ich ruchu przez warstwę przyścienną wynosi

$$q_d = \dot{m}_d'' C_{pl}(t_w - t_\infty). \quad (2.2)$$

Rozwiązując równania warstwy przyściennej przy uwzględnieniu (2.2), uzyskuje się profil

temperatury w tej warstwie

$$t = t_w + \left(t_\infty - t_w + \frac{b}{d} \delta_g \right) \frac{\exp(dY) - 1}{\exp(d\delta_g) - 1} - \frac{b}{d} Y, \quad (2.3)$$

gdzie

$$d = \frac{\bar{v}_g}{a}, \quad b = \frac{q_d}{\delta_g k_g}.$$

Wynikająca z równania (2.3) gęstość strumienia ciepłego wynosi

$$q_c = -k_g \left(\frac{\partial t}{\partial Y} \right)_{Y=0} = -k_g \left[\frac{\left(t_\infty - t_w + \frac{b}{d} \delta_g \right) d}{\exp(d\delta_g) - 1} - \frac{b}{d} \right]. \quad (2.4)$$

Jeżeli teraz dla porównania rozpatrzmy przepływ powietrza suchego, wówczas na podstawie równania (2.3), przy warunku $b=0$, otrzymuje się profil temperatury

$$t_0 = t_w + (t_\infty - t_w) \frac{\exp(dY) - 1}{\exp(d\delta_g) - 1} \quad (2.5)$$

oraz gęstość strumienia ciepłego

$$q_{c0} = -k_g \left(\frac{\partial t}{\partial Y} \right)_{Y=0} = -k_g \frac{(t_\infty - t_w) d}{\exp(d\delta_g) - 1} = \alpha_{g0} (t_w - t_\infty). \quad (2.6)$$

Zgodnie z poczynionymi w modelu założeniami, separacja kropelek na płytę zachodzi przede wszystkim pod wpływem turbulencji strumienia swobodnego. W związku z tym, dla określenia separacji można posłużyć się analogią między procesami wymiany ciepła masy i pędu. Opierając się na analogii Reynoldsa*, gęstość strumienia masy powietrza płynącego do płyty można wyrazić zależnością

$$g = \frac{\alpha_{g0}}{C_{pg}}, \quad (2.7)$$

a stąd gęstość strumienia kropelek

$$\dot{m}_d'' = xg = x \frac{\alpha_{g0}}{C_{pg}}. \quad (2.8)$$

Gęstość strumienia ciepłego q_{vap} , wynikającego z parowania filmu wodnego, można przedstawić jako

$$q_{vap} = \dot{m}_d'' r = \alpha_{vap} (\rho_{vw} - \rho_{v\infty}) r. \quad (2.9)$$

Dla niezbyt wysokich temperatur filmu wodnego, współczynnik wymiany masy α_{vap} wyrazić można poprzez współczynnik wymiany ciepła α_{g0} , na podstawie związku wynikającego z analogii wymiany ciepła i masy

$$\frac{\alpha_{g0}}{\alpha_{vap}} = \rho_g C_{pg} Le^{\frac{2}{3}}, \quad (2.10)$$

* Autor posłużył się analogią Reynoldsa w sposób podany przez D. B. Spaldinga w jego dziele *pt. Convective Mass Transfer*, publ. E. Arnold Ltd., London 1963 (*przyp. Red.*).

a w związku z tym, zależność (2.9) można przedstawić w postaci

$$q_{\text{vap}} = \frac{\alpha_{g0}(\rho_{vw} - \rho_{v\infty})r}{\rho_g C_{pg} L e^{\frac{2}{3}}}. \quad (2.11)$$

Na podstawie zależności (2.4) oraz (2.11) gęstość strumienia ciepłego na płycie wynosi

$$q_w = -k_g \left[\frac{\left(t_{\infty} - t_w + \frac{b}{d} \delta_g \right) d}{\exp(d\delta_g) - 1} \right] + \frac{\alpha_{g0}(\rho_{vw} - \rho_{v\infty})r}{\rho_g C_{pg} L e^{\frac{2}{3}}}. \quad (2.12)$$

Powyższą wartość strumienia można porównać z wartością, jaką uzyskuje się przy opływie płyty powietrzem suchym. Dzieląc obustronnie (2.12) przez (2.6), otrzymuje się w ten sposób stopień intensyfikacji wymiany ciepła dla płyty, wynikający z faktu użycia powietrza mgłowego zamiast suchego do odprowadzenia ciepła od płyty

$$\frac{q_w}{q_{c0}} = 1 + \underbrace{\frac{\dot{m}_d'' C_{pl}}{k_g d} \left(\frac{\exp(d\delta_g) - 1}{d\delta_g} - 1 \right)}_{E_c} + \underbrace{\frac{(\rho_{vw} - \rho_{v\infty})r}{\rho_g C_{pg} L e^{\frac{2}{3}}(t_w - t_{\infty})}}_{E_v}. \quad (2.13)$$

Można go symbolicznie napisać w formie współczynników intensyfikacji wymiany ciepła

$$E_t = E_c + E_v, \quad (2.14)$$

lub po dalszych przekształceniach, w innej dogodnej formie

$$E_t = c + kx, \quad (2.15)$$

gdzie

$$c = 1 + E_v, \quad (2.16)$$

$$k = \frac{\alpha_{g0} C_{pl}}{k_g d C_{pg}} \left(\frac{\exp(d\delta_g) - 1}{d\delta_g} - 1 \right). \quad (2.17)$$

Analiza zależności (2.17) wykazuje, iż współczynnik k jest tylko funkcją temperatury. Dla zakresu temperatur powietrza od 0 do 50°C, $k \cong 10$.

Przedstawione powyżej rozważania odnoszą się do płyty całkowicie zwilżonej filmem wodnym. Jeżeli w trakcie opływu płyty zmniejsza się stopniowo zawartość wilgoci w powietrzu, to przy pewnej zawartości, którą można uznać za krytyczną, przepływ filmu zanika, a na płycie pojawiają się drobne kropelki wody, które zwilżają tylko częściowo powierzchnię płyty. Obszar niezupełnego zwilżenia płyty rozciąga się więc między $x=0$ a $x=x_{cr}$.

Krytyczną zawartość wilgoci określić można z warunku równości gęstości strumienia masy separujących się kropelek oraz strumienia pary, a więc warunku

$$\dot{m}_{vcr}'' = \dot{m}_{dcr}''. \quad (2.18)$$

Gęstość strumienia masy pary $\dot{m}_v'' = \text{const}$ dla $x \geq x_{cr}$, w związku z czym można ją przedstawić, na podstawie zależności (2.9), (2.11), (2.14), jako

$$\dot{m}_{vcr}'' = \frac{E_v \Delta t}{r} \alpha_{g0}, \quad (2.19)$$

natomiast gęstość strumienia kropelek wynosi według równania (2.8) dla warunków krytycznych

$$\dot{m}_{dcr}'' = x_{cr} \frac{\alpha_{g0}}{C_{pg}}. \quad (2.20)$$

Stąd poszukiwana zawartość krytyczna wilgoci

$$x_{cr} = \frac{E_v \Delta t C_{pg}}{r}. \quad (2.21)$$

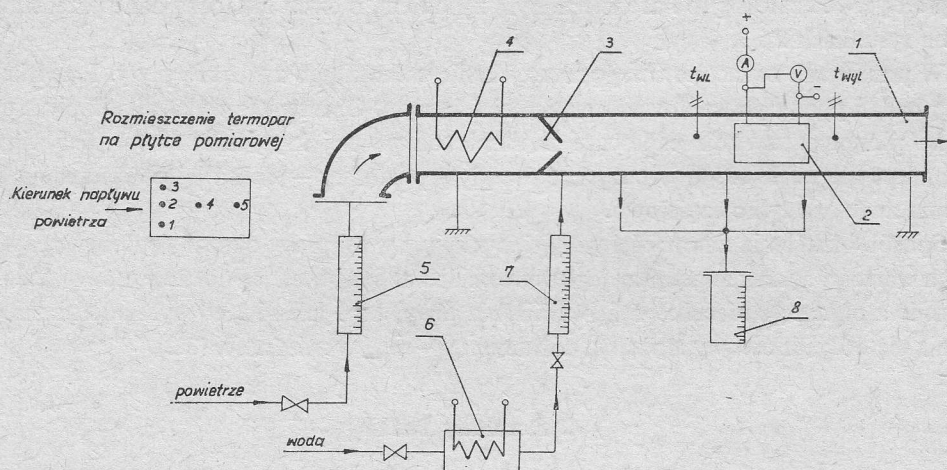
Dla $x > x_{cr}$ powierzchnia płyty pokryta jest filmem i dla takiego przypadku obowiązuje zależność (2.13). Zależność ta stanowi podstawę dla porównania wartości obliczeniowych współczynnika intensyfikacji wymiany ciepła E_t z wartościami eksperymentalnymi, przez co możliwe staje się sprawdzenie poprawności rozważanego powyżej modelu zjawiska.

3. Stanowisko badawcze

Badania wymiany ciepła podczas opływu płyty powietrzem mgłowym przeprowadzono na zmodyfikowanym stanowisku szczegółowo opisanym w pracy [2]. Schemat ideowy tego stanowiska pokazany jest na rysunku 1.

Płyta ze stali nierdzewnej 1H18N9T o wymiarach $72 \times 165 \times 1$ mm umieszczona była w rurze szklanej o średnicy 72 mm i długości 1700 mm. Nagrzewanie płyty odbywało się bezpośrednio prądem elektrycznym, płynącym z prądnicy prądu stałego. Powietrze mgłowe, będące mieszaniną dwufazową powietrza nasyconego i drobnych kropelek wody, wytworzono w specjalnym rozpylaczu typu iniektorowego.

W przeprowadzonych doświadczeniach mierzono: temperaturę płyty, temperaturę powietrza, moc elektryczną doprowadzoną do płyty, natężenie przepływu powietrza, natężenie



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska do badania wymiany ciepła podczas opływu płyty powietrzem mgłowym

1 - kanał, 2 - płyta pomiarowa, 3 - rozpylacz, 4 - podgrzewacz powietrza, 5, 7 - rotametry, 6 - podgrzewacz wody, 8 - zbiornik pomiaru separującej się wody

przepływu wody, ilość masową kropelek wody wyseparowanych na ściance kanału (rury) i wilgotność powietrza atmosferycznego.

Temperaturę płyty mierzono za pomocą pięciu termopar płaszczowych żalazo-konstantanowych, natomiast temperaturę powietrza mgłowego przed i za płytą termometrami rtęciowymi. Natężenie przepływu wody $\dot{m}_{w0}$ doprowadzonej do rozpylacza mierzono rotametrem, zaś ilość wody wyseparowanej na rurze naczyniem kalibrowanym. Na podstawie pomiarów wilgotności powietrza, dokonywanych za pomocą wilgotnościomierza elektrochemicznego typu WEB, określono ilość wody $\dot{m}_{wn}$ potrzebnej każdorazowo do nasycenia powietrza atmosferycznego.

Zawartość wilgoci w powietrzu obliczono ze związku

$$x = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_w + \dot{m}_g}, \quad (3.1)$$

gdzie

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{w0} - \dot{m}_{sep} - \dot{m}_{wn}. \quad (3.2)$$

Współczynnik intensyfikacji wymiany ciepła E_t określono pośrednio, poprzez wyznaczenie dla każdego warunków pomiarowych strumieni ciepłych q_w płyty omywanej powietrzem suchym oraz powietrzem mgłowym. Opierając się na pomiarze temperatury płyty i powietrza, wyznaczono następnie wartości współczynników wymiany ciepła dla przepływu powietrza suchego i mgłowego. Stosunek tych współczynników wyznaczał wartości współczynnika intensyfikacji E_t . Pomiary przeprowadzono dla pionowego i poziomego położenia płyty. Dla łatwiejszego porównania wartości eksperymentalnych E_t z wartościami obliczeniowymi, pomiary starano się prowadzić dla ustalonych z góry parametrów:

$$t_w = 20, 30, 40, 50^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = t_w - t_\infty = 10^\circ\text{C}$$

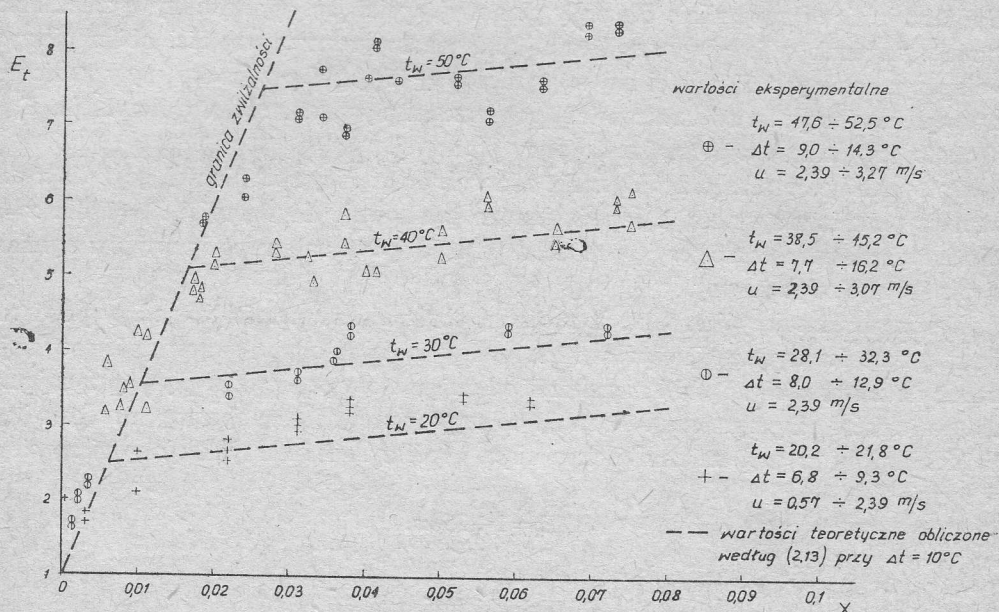
W praktyce okazało się to bardzo trudnym zadaniem, o czym świadczą dane przedstawione na rysunkach 2 i 3.

W pomiarach zwracano uwagę na uzyskanie całkowitego zwilżenia płyty. Przed każdą serią badań płyta była szlifowana papierem ściernym. Obserwacje wykazały, iż płyta ustawiona pionowo uzyskuje całkowite zwilżenie od pewnej krytycznej zawartości wilgoci, natomiast nie udało się tego pozyskać dla płyty poziomej — dolna jej powierzchnia była zawsze zwilżona tylko częściowo.

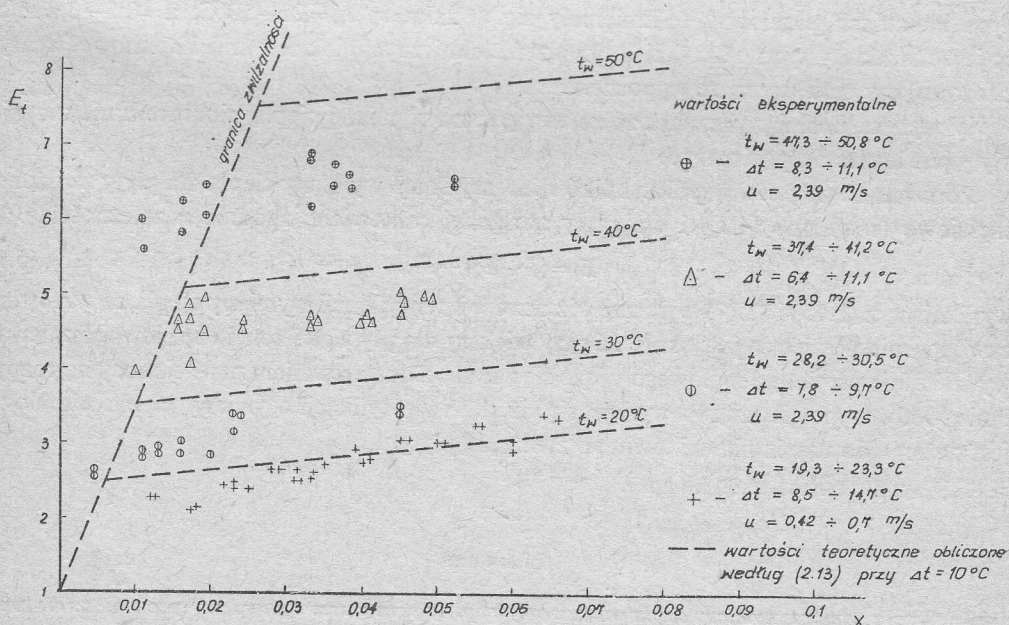
Sposób określenia zawartości wilgoci x przyjęty w tej pracy okazał się dobry dla większych wartości x , natomiast przy jego wartościach zbliżających się do zera (co wiązało się głównie z obszarem niecałkowitego zwilżenia płyty) błąd ten rósł, co wynikało ze zmniejszenia się dokładności wyznaczania różnicy $\dot{m}_{w0} - \dot{m}_{sep}$ w zależności (3.2).

4. Rezultaty badań

Uzyskane z badań wartości eksperymentalne współczynnika intensyfikacji wymiany ciepła E_t w funkcji zawartości wilgoci powietrza mgłowego dla pionowego i poziomego położenia płyty przedstawiono na rysunkach 2 i 3 na tle wartości obliczeniowych określonych zależnością (2.13). Jak widać, uzyskano dobrą zgodność teorii z eksperymentem.



Rys. 2. Wartości teoretyczne oraz eksperymentalne współczynnika intensyfikacji E_t w funkcji zawartości wilgoci dla płyty pionowej



Rys. 3. Wartości teoretyczne oraz eksperymentalne współczynnika intensyfikacji E_t w funkcji zawartości wilgoci dla płyty poziomej

Uwidacznia się to szczególnie dla płyty pionowej, spełniającej postawiony w założeniach modelu warunek całkowitego zwilżenia. Maksymalny rozrzut wartości obliczeniowych i eksperymentalnych E_t mieści się w granicach $\pm 15\%$. W przypadku płyty poziomej, z uwagi na niezupełne zwilżenie dolnej powierzchni płyty, wartości współczynnika E_t są o około 15% niższe w stosunku do płyty pionowej.

Potwierdziły się także przewidywania odnośnie do granicy zwilżalności, gdyż dla $x < x_{cr}$ współczynnik intensywności E_t spada bardzo gwałtownie do wartości $E_t = 1$ dla $x = 0$. Można tym samym uznać przyjęty model separacji, oparty na analogii procesów wymiany ciepła i masy, za poprawny.

Bardzo interesujący jest fakt, iż z chwilą obniżenia zawartości wilgoci w powietrzu poniżej wartości krytycznej, współczynnik intensywności E_t obniża swą wartość proporcjonalnie do zawartości wilgoci i niezależnie od temperatury powietrza i płyty (przynajmniej dla warunków eksperymentu). Pozwala to zaproponować dla obszaru niecałkowitego zwilżenia płyty ($x < x_{cr}$) zależność określającą współczynnik intensyfikacji wymiany ciepła w formie

$$E_t = 1 + 250x. \quad (4.1)$$

5. Wnioski końcowe

Przedstawione w pracy wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają poprawność zaproponowanego w [1] modelu wymiany ciepła przy opływie płyty powietrzem mgłowym, w zakresie odpowiadającym założeniom modelu, a więc w szczególności dla zakresu niższych temperatur ścianki oraz niskich prędkości przepływu powietrza. W przeprowadzonych badaniach parametry te zmieniały się w zakresie $t_w = 20 - 50^\circ\text{C}$, $u = 0,5 - 3,2$ m/s, co jest charakterystyczne dla takich urządzeń technicznych, jak chłodnie kominowe (wentylatorowe) czy też skraplacze wyporne.

W wyniku badań wykazano, że ze względu na wymianę ciepła pionowe umieszczenie płyty jest lepsze od poziomego.

Porównanie wartości współczynników intensyfikacji wymiany ciepła dla płyty zwilżonej częściowo (równanie (4.1)) i dla płyty zwilżonej całkowicie, zgodnie z zależnością

$$E_t = (1 + E_o) + 10x \quad (5.1)$$

wynikającą z (2.15) i (2.17) wykazuje, iż wzrost intensyfikacji wymiany ciepła ze wzrostem zawilgocenia powietrza jest około 25 razy większy dla płyty zwilżonej częściowo. Ponieważ wytwarzanie powietrza mgłowego wiąże się zawsze z dostarczeniem pewnej mocy na rozpylanie wody w powietrzu, to wydaje się, iż dla intensyfikacji wymiany ciepła niecelowe jest dążenie do uzyskania całkowitego zwilżenia płyty.

Praca wpłynęła do Redakcji w listopadzie 1978 r.

Literatura

- [1] M. Trela, *Analiza wymiany ciepła podczas opływu płyty powietrzem mgłowym*. Prace IMP z. 77, 1980.
- [2] J. Kowalski, *Intensyfikacja wymiany ciepła w nagrzewnicach powietrza poprzez zwiększenie stopnia zawilgocenia*. Konferencja naukowo-techniczna n.t. „Aktualne zagadnienia techniki klimatyzacyjnej”. Wrocław 1978.

Исследование тепло- и массообмена во время ламинарного обтекания плиты туманным воздухом

Резюме

В работе представлены в сокращении самые важные предположения и зависимости предлагаемой в [1] модели теплообмена между плитой и потоком туманного воздуха. Затем описан экспериментальный стенд и представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента интенсификации теплообмена. В результате сравнения экспериментальных и теоретических значений этого коэффициента подтверждается правильность этой модели в пределах рассматриваемых параметров воздуха. На основе представленной модели и результатов экспериментальных исследований предложены для практических целей две простые зависимости (4.1) и (5.1), описывающие коэффициент интенсификации теплообмена для плиты частично увлажненной капельками воды, как и полностью покрытой водяной пленкой.

Investigations of Heat and Mass Transfer in a Laminar Mist Flow Over a Plate

Summary

The paper offers a brief presentation of essential assumptions and relations for a model, as proposed in [1], of heat transfer from a plate to a mist flow. The test stand is described and results of experimental investigations of the heat transfer intensification coefficient are presented. Comparison of experimental and theoretical results (relation (2.13)) has confirmed the correctness of the model within the range of air-water mixture parameters taken into consideration. Basing on the model and experimental results two simple relations, (4.1) and (5.1), have been derived which express the heat transfer intensification coefficient for a plate partially wetted with water droplets and one entirely covered by water film.