

Jurij W. ONCZYNNIKOW

Nowosybirski Instytut Elektrotechniczny

Janusz WANDRASZ

Instytut Techniki Ciepłej Pol. Śl.

BADANIA INTENSYFIKACJI WYMIANY CIEPŁA W KRÓTKICH PIONOWYCH RURACH PRZY PRZEPŁYWIE DYSPERSYJNO PIERŚCIENIOWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań nad intensyfikacją wymiany ciepła w krótkich pionowych rurach przy przepływie dyspersyjno pierścieniowym. Badania główne przedstawione w pracy (8) zostały w niniejszej pracy uogólnione dla przypadku, gdy l/d ma wyraźny wpływ na wymianę ciepła ($l/d < 60$). Wyniki badań przedstawiono w postaci uogólnionej zależności uwzględniającej wpływ stosunku l/d na liczbę Nusselta.

1. Wstęp

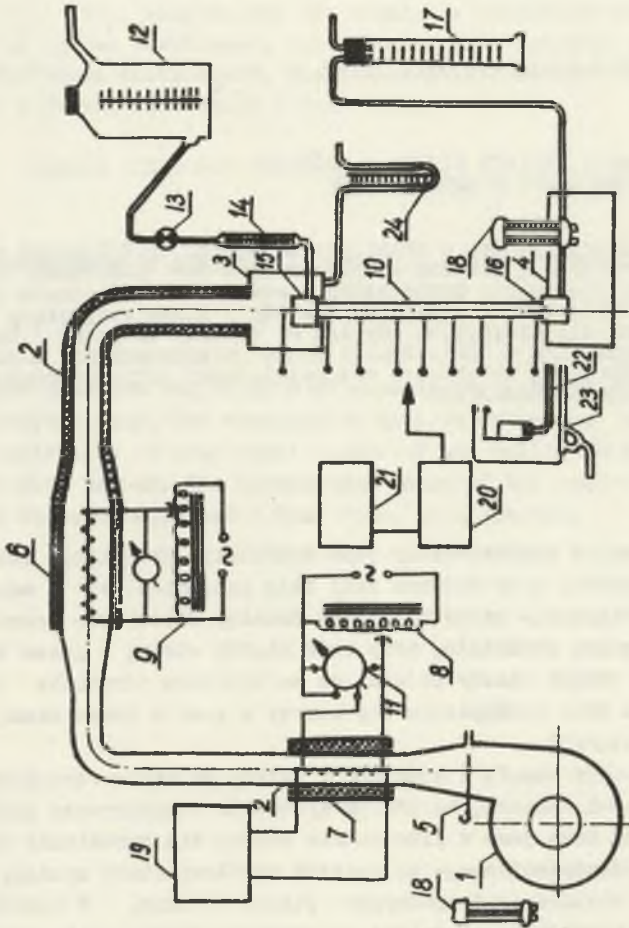
Przepływ dyspersyjno pierścieniowy jest dwufazowym przepływem cieczy w postaci cienkiej warstwy przy ścianie rury oraz gazu niesącego z sobą krople cieczy i wypełniającego pozostałą część kanału. Między obu fazami występuje wyraźna granica rozdziału, przy czym między cieczą a gazem zachodzi ciągła wymiana kropeł cieczy polegająca na zjawisku odrywania ich i unoszenia przez gaz oraz wykraplania się cieczy z gazu z równoczesną wymianą ciepła i substancji.

Intensywność wymiany ciepła i substancji zależy od wielu czynników, a wśród nich od długości odcinka, na którym występuje rozpatrywany przepływ.

Do chwili obecnej brak jest w literaturze danych dla określenia wpływu odcinka rozbiegu hydrodynamicznego na wartość współczynników wymiany ciepła i substancji w strumieniu dyspersyjno pierścieniowym. W niektórych pracach przyjęto, że wpływ tego odcinka nie odgrywa praktycznie większej roli dla $l/d > 50$ [1], [4].

W zagadnieniach praktycznych występują przypadki, w których wpływ odcinka rozbiegowego nie powinien być pominięty. Stąd wynika konieczność zbadania jego wpływu na wartości współczynników wymiany ciepła i substancji.

Intensyfikacja wymiany ciepła i substancji zależy nie tylko od wielkości hydrodynamicznych lecz również od wielkości termodynamicznych uju-



Rys. 1. Schemat starowiska pomiarowego

1 - wentylator, 2 - przewód powietrzny, 3 - Górna część komory, 4 - dolna część komory, 5 - element dławiaczy, 6 - grzejnik elektryczny, 7 - mostek Thomsona, 8, 9 - autotransformatory, 10 - badana rura, 11 - pomiar mocy, 12 - naczynie pomiarowe cieczy, 13 - zawór, 14 - rotametr, 15 - zbiornik z przelawem, 16 - zbiornik cieczy, 17 - element, 18 - psychrometr Asmanna, 19, 20 - potencjometry, 21 - galvanometr zerowy, 22 - mokrzy termoelement, 23 - sonda laboratoryjna, 24 - manometr

jących parametry stanu, tj. od temperatury bezwzględnej, różnicy temperatur oraz ciśnienia składnikowego w jądrze fazy gazowej i na powierzchni międzyfazowej.

Wpływ parametrów termicznych jest różny dla procesów wymiany ciepła i wymiany substancji i zależy od kierunku przepływu strumienia ciepła. W badaniach wpływu wielkości hydrodynamicznych należy więc przewidzieć wpływ parametrów termicznych lub zapewnić takie warunki prowadzenia badań, dla których wpływ ten można pominąć. Dlatego przeprowadzono wstępne badania intensyfikacji wymiany ciepła dla warunków adiabatycznych i nieadiabatycznych [8].

2. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 1. Badania przeprowadzono w rurkach stalowych o grubości ścianki 10^{-3} m, średnicy wewnętrznej 0,01; 0,012; 0,014 m i długości odpowiednio 0,91; 0,81; 0,62 m.

Blonę cieczy na wewnętrznej powierzchni rurki uzyskiwano stosując układ przelewowy. Wodę doprowadzono do zbiornika 15, w którym badana rurka stanowiła przelew, w części dolnej woda spływała do zbiorniczka 16, skąd była odprowadzana.

Wzdłuż badanej rurki umieszczono termoelementy miedź-konstantan. Temperaturę cieczy odpływającej zmierzono w zbiorniku 15. Przyjmowano, że jej temperatura przy wypływie jest równa temperaturze powierzchni rurki w przekroju wylotowym.

Cztery termoelementy umieszczone w środku pierścieniowych powierzchni przekroju poprzecznego rurki służyły do pomiaru temperatury powietrza przy dopływie. Powierzchnie pierścieniowe dobrano w ten sposób, aby ich suma pól była równa całkowitemu polu powierzchni, przy czym poszczególne pola są sobie równe. W układzie pomiarowym zastosowano psychrometr Asmana umożliwiający określenie zawilżenia powietrza dopływającego i odpływającego. Ponadto w układzie zastosowano grzejnik 6 zapewniający stałą temperaturę powietrza przy dopływie w ciągu całego okresu pomiarowego. Zastosowanie grzejnika pozwalało uzyskać temperaturę stałą dla danej serii pomiarowej, jednakże różną w różnych seriach. Strumień powietrza dopływającego do układu modelowego określono za pomocą mostka Thomsona.

Zakres występowania przepływu dyspersyjno-pierścieniowego ustalono na podstawie danych z literatury [6], a także wizualnie za pomocą specjalnie skonstruowanego układu lusterek pozwalającego na obserwację procesów zachodzących wewnątrz badanej rurki.

Badania prowadzono również dla nieadiabatycznej wymiany ciepła w rurce. W tym celu stosowano nagrzewanie rury prądem elektrycznym doprowadzonym z transformatora spawarki. Powietrze dopływające do układu wstępnie nawilżano, co powodowało przebieg procesu przy dużym stopniu zawilżenia strumienia gazu.

Wilgotność powietrza oraz jego temperatura mierzono w górnej części stanowiska pomiarowego 3 za pomocą specjalnej sondy [7] pozwalającej określić temperaturę gazu suchego 23 wyposażonej w zabudowany termoelement mokry 22.

3. Wyniki obliczeń

Liczby kryterialne odpowiednio dla przepływu ciepła i substancji Nu , Sh , Pr , Sc , Re obliczano zgodnie z teorią stosowaną w procesach wymiany ciepła i substancji przy przepływie powietrza z równoczesnym odparowaniem cieczy [1].

Obliczone liczby kryterialne Nu i Sh porównano z wartościami Nu_0 i Sh_0 określonymi podług równań wymiany ciepła i substancji zjawisk pojedynczych

$$Nu_0 = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (1)$$

dla wymiany substancji przyjęto podobną postać wzoru jak dla Nu_0

$$Sh_0 = 0,023 Re^{0,8} Sc^{0,4} \quad (2)$$

Badania wykazały, że parametry termiczne mają wyraźny wpływ na intensywność wymiany ciepła i masy.

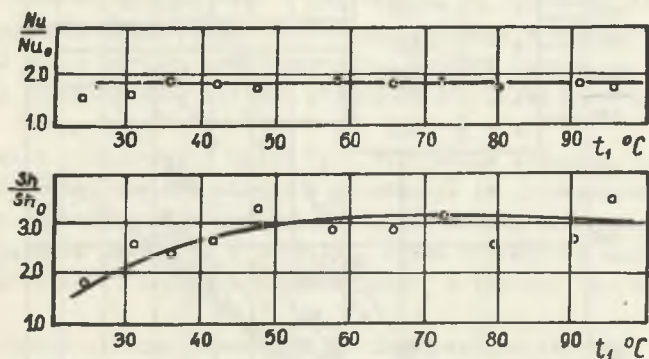
W procesie adiabatycznym podwyższenie temperatury powietrza powyżej 50°C przy dopływie do kanału wpływa na intensyfikację wymiany masy, wpływ zaś na wymianę ciepła jest nieznaczny (rys. 2a).

W warunkach nieadiabatycznych podwyższenie gęstości strumienia ciepła przy niezmiennych pozostałych parametrach procesu powoduje wzrost intensyfikacji przepływu ciepła, nie wpływając na wzrost intensywności wymiany substancji (rys. 2b). We wszystkich przypadkach otrzymano wyraźne podwyższenie współczynników wymiany ciepła i substancji w wyniku zmian parametrów hydrodynamicznych: współpraca między gazem i powierzchnią warstewki przysiciennej cieczy oraz wymiana masy kroplami między warstewką cieczy i jądrem strumienia gazu.

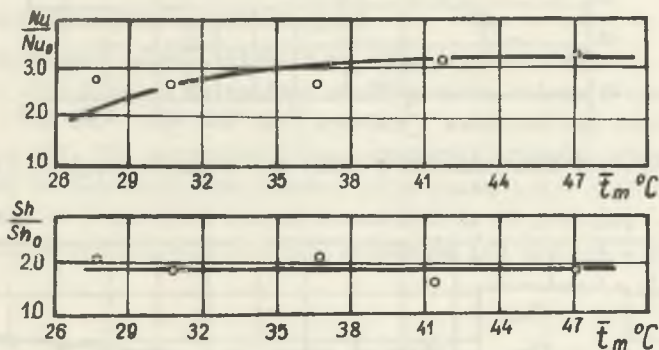
Badania wpływu odcinka rozbiegu hydrodynamicznego przeprowadzono przy założeniu warunków adiabatycznych dla mieszanin wodno-powietrznych przy $l/d = 5, 10, 20, 30, 40, 60$. Na podstawie badań wstępnych pominięto wpływ parametrów termodynamicznych. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 3. Z zamieszczonego wykresu wynika, że odcinek rozbiegowy ma praktyczny wpływ na wymianę ciepła przy $l/d < 40$ (przy badaniach prowadzonych z dokładnością $\pm 10\%$).

Ocenę wpływu odcinka rozbiegowego na zjawisko wymiany substancji dla warunków nieadiabatycznych określono wykonując odrębne badania. Kanał roboczy ($d = 0,010 \text{ m}$, $l = 1,5 \text{ m}$) posiadał otwory rozmieszczone wzdłuż two-

rzącej w odstępach 100 mm, przez które w jądro dyspersyjno-pierścieniowego strumienia wprowadzono laboratoryjną sondę (do pomiaru temperatury gazu) wraz z mokrym termoelementem.



a) $d = 0,014$; $L = 0,925$; $Re \approx 33000$



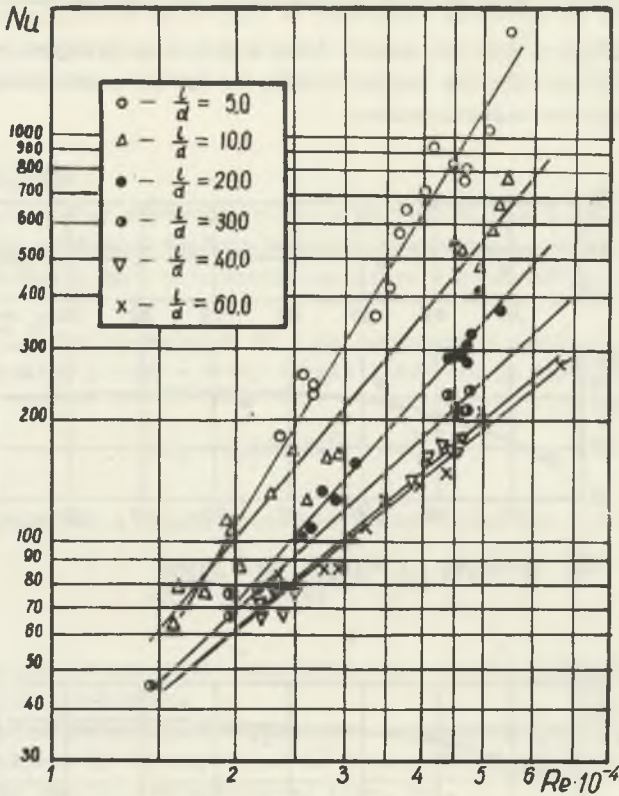
b) $d = 0,014$; $L = 0,735$; $Re \approx 35000$

Rys. 2. Wpływ parametrów termicznych na zjawisko intensyfikacji wymiany ciepła i substancji:

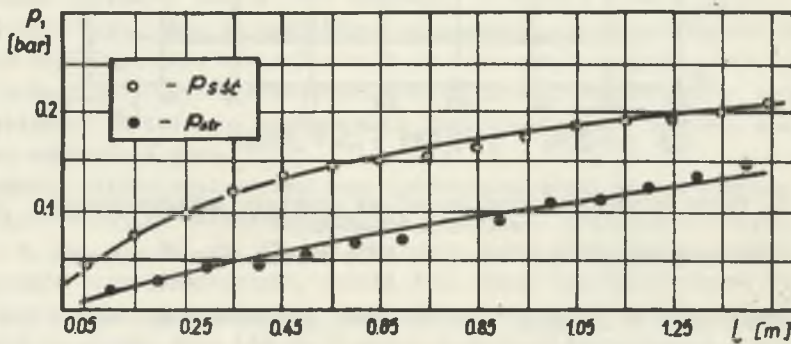
a) przepływ adiabatyczny, b) przepływ nieadiabatyczny

Wprowadzanie do badanego obszaru sondy pomiarowej wywołuje w nim zaburzenie charakteru strumienia dwufazowego. Wynika stąd, wniosek, że rezultaty tych badań mogą stanowić jedynie podstawę jakościowej oceny zjawiska.

Przy ustalonym strumieniu ciepła dopływającym wzdłuż wysokości kanału przebieg zmian Sh można określić podług różnic ciśnień składnikowych na granicy rozdziału faz i w jądrze strumienia.



Rys. 3. Zależność $Nu = f(Re)$ dla stałej wartości l/d



Rys. 4. Rozkład ciśnień składnikowych pary przy ścianie i w strumieniu gazu wzdłuż badanego kanału

Na rysunku 4 przedstawiono uzyskany w wyniku przeprowadzonych badań wykres zmian ciśnień cząstkowych w zależności od odległości od przekroju początkowego badanego kanału. Wynika z niego wniosek, że odcinek rozbiegowy występuje na długości 30-35 średnic rury.

Otrzymane dane są zgodne z dotychczasowymi badaniami dotyczącymi hydrodynamicznego odcinka rozbiegowego i jego wpływu na tworzenie się dwufazowego przepływu dyspersyjno-pierścieniowego. Jednakże w świetle przeprowadzonych badań wpływ odcinka rozbiegowego na wymianę ciepła i substancji jest bardziej skomplikowany niż dla przypadku przepływu strumieni jednofazowych.

Głównym celem prowadzonych badań było otrzymanie równania kryterialnego ujmującego proces wymiany ciepła i substancji w dyspersyjno-pierścieniowych słabo wypełnionych strumieniach (ilość cieczy mniejsza niż 1% w jednostce objętości gazu [8]). W toku tych badań wyjaśniono analogię między zjawiskami czysto cieplnymi i dyfuzyjnymi w różnych warunkach tych przepływów.

Analogia między wymianą substancji i ciepła zgadza się dość dokładnie przy zachowaniu podobieństw warunków brzegowych, $Pr \approx Sc$ i przy niezbyt dużej różnicy temperatur pomiędzy warstwą cieczy i jądrem strumienia zarówno w warunkach adiabatycznych, jak i nieadiabatycznych.

4. Matematyczne opracowanie wyników badań

Analiza zależności przedstawionych na rys. 3 pozwoliła dla $l/d > 50$ pominąć wpływ stosunku l/d na wartość współczynnika wnikania ciepła. W zakresie $0 < l/d < 50$ wpływ ten jest wyraźny i zwiększa się wraz z malejącym stosunkiem l/d . Dla uprządkowania uzyskanych wyników przyjęto uzależniać liczbę Nu dla dowolnego zakresu l/d z obszaru $0 < l/d < 60$ od wartości liczby Nu dotyczącej dużych wartości l/d . Za podstawę przyjęto równanie uzyskane metodą najmniejszych kwadratów [2] dla $l/d = 60$ w postaci

$$Nu_{60} = 0,000236 Re^{1,258}. \quad (3)$$

Zależność między Nu dla dowolnego l/d oraz Nu_{60} przyjęto oznaczać podobnie jak w teorii wymiany ciepła poprawkę δ_1 [3]

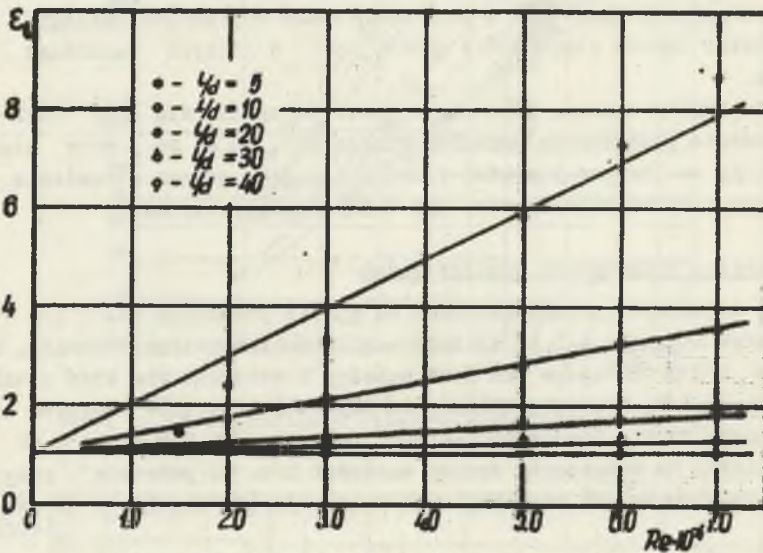
$$Nu = \delta_1 Nu_{60}. \quad (4)$$

Wartość tej poprawki jest zależna nie tylko od stosunku l/d , lecz także od liczby Re , na co wskazuje charakter krzywych z wykresu 3

$$\delta_1 = f(l/d, Re). \quad (5)$$

Równanie (5) winno dla $l/d = 60$ osiągać wartość bliską jedności. Na podstawie danych pomiarowych uzyskano zależność $Nu = f(Re)_{l/d}$ dla kilku wartości liczb Re i określono wartości poprawki ξ_1 . Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5. Widać tu wyraźnie, że poza wartościami $l/d = 5$ uzyskane zależności można aproksymować pękiem linii prostych wychodzących z punktu $(0,1)$. Dość znaczne odchylenia dla $l/d = 5$ nie mogą podważyć przyjętego założenia; gdyż dokładność badań dla tego przypadku jest mała (zbyt mały odcinek pomiarowy, duże zaburzenia obszaru), a zgodnie z opiniami literatury odchylenia rzędu $\pm 50\%$ należy uznać jako zadowalające. Ostatecznie do dalszej analizy przyjęto zależność

$$\xi_1 = (1 + A Re)_{l/d} \quad (6)$$



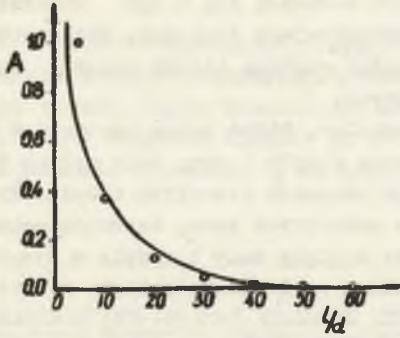
Rys. 5. Zależność ξ od liczby Reynoldsa

Występujący w równaniu (6) współczynnik regresji A jest funkcją stosunku l/d . Zależność tę przedstawiono na rysunku 6. Wartości A otrzymano określając zależność (6) metodą najmniejszych kwadratów [2]. Najmniejsze odchylenie standardowe dla kilku badanych krzywych uzyskano dla funkcji wykładniczej typu

$$A = C \exp(B \frac{1}{l/d}) \quad (7)$$

Ostatecznie przyjęto do obliczeń zależność (5) w postaci

$$\epsilon_1 = 1 + C \operatorname{Re} \exp\left(B \frac{1}{d}\right). \quad (8)$$



Rys. 6. Wykres zależności współczynnika regresji A od stosunku $1/d$

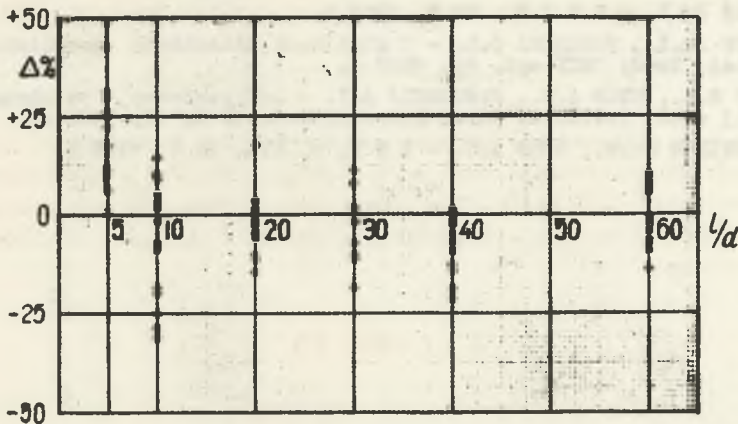
Obliczenie krzywej regresji przeprowadzono na maszynie cyfrowej ZAM-41 przyjmując do obliczeń równanie (8) w postaci

$$\frac{Nu - Nu_{60}}{Nu_{60}} = C \operatorname{Re} \exp\left(B \frac{1}{d}\right). \quad (9)$$

Powyższe równanie po obustronnym zlogarytmowaniu w układzie współrzędnych logarytmicznych przedstawia linię prostą. W obliczeniach wykorzystano wartości 76 punktów pomiarowych uzyskując jako postać ostateczną równanie

$$\epsilon_1 = 1 + 0,96 \cdot 10^4 \operatorname{Re} \exp(-0,0887 \ 1/d) \quad (10)$$

słuszne dla zakresu $5 < 1/d < 60$ oraz liczb Reynoldsa w zakresie $1,5 \cdot 10^4 < \operatorname{Re} < 7 \cdot 10^4$. Odchylenie punktów pomiarowych od otrzymanego równania jest dość znaczne dla wartości małych stosunków $1/d$ (rys. 7). Wielkość Δ na rysunku 7 przedstawia względną odchyłkę wartości zmierzonej i obliczonej z równania (10) odniesioną do wielkości pomiarowej.



Rys. 7. Wykres względnych odchyłek Δ dla zależności przedstawionej równaniem (10)

Może nasunąć się wątpliwość czy otrzymana dokładność wyznaczania poprawki jest wystarczająca. Przeprowadzono dodatkowe obliczenia dla funkcji o postaciach bardziej złożonych od (8). Rozrzuty punktów pomiarowych od wartości uzyskiwanych z zakładanych funkcji różniły się niezbyt dużo. Przyjmując, że oszacowana dokładność badań wynosi $\pm 10\%$ oraz odchyłki uzyskanej postaci (10) w większości przypadków mieszczą się w tym zakresie (rys. 7) można zależność (10) uznać za wystarczająco dokładną. Większą dokładność można byłoby uzyskać przeprowadzając większą liczbę badań z zastosowaniem dokładniejszych metod pomiarowych.

W pracy [8] otrzymano zależności kryterialne, które można zastosować w przypadkach skażonej analogii między wymianą ciepła i masy oraz wpływu hydrodynamicznych warunków na intensyfikację procesów przepływu ciepła. Wyniki przedstawione w niniejszej pracy dla omówionych wyżej warunków pozwalają rozszerzyć uzyskane wnioski na proces wymiany masy i ciepła w dyspersyjno pierścieniowym przepływie adiabatycznym i nieadiabatycznym w krótkich rurach.

Na zakończenie autorzy pragną podziękować prof. dr inż. Janowi Szargutowi za wiele cennych uwag i wskazówek przy opracowywaniu niniejszego artykułu.

LITERATURA

- [1] BERMAN L.D. - Isparitielnoie ochładzienie cirkulacionnoj wody. Gosenergoizdat. M.L. 1957 r.
- [2] LINNIK J.W. - Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowywania obserwacji. Warszawa, PWN. 1962 r.
- [3] MADEJSKI J. - Teoria wymiany ciepła, PWN, Warszawa, 1963 r.
- [4] PALEJEW I.I., AGAFONOWA F.A., ŁAWRIENTIEW M.F., MALUS-MALICKIJ K.P. - Energomaszynostroienie, 3, 1968.
- [5] SCROKIN Ju.L. - P.M.T.F., Nr 6, 1963 r.
- [6] SCROKIN Ju.L., PUSZKINA O.L. - O rieżimach tieczienia gazożidkostnych smieszey, Trudy CKTI wyd. 47, 1964 r.
- [7] RYWKIN S.A., HOZE A.N., JAWORSKIJ A.I. - Aspiracionnyj psichrometri-czeskiy zond, Izwestia WUZow Priborostroienie Nr II, 1968 r.
- [8] OWCZYNNIKOW Ju.W., HOZE A.N. - I F Ż, t. XIX, Nr 1, 1970 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛА В КОРОТКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ
ПРИ ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОМ ТЕЧЕНИИ

Резюме

В работе представлены результаты исследования интенсификации теплообмена при дисперсно-кольцевом течении двухфазной смеси в коротких вертикальных трубах. Ранее выполненные исследования [8] обобщаются на случай, когда $\frac{l}{d}$ имеет заметное влияние на теплообмен ($\frac{l}{d} < 60$). Получена зависимость, выражающая отношения $\frac{1}{d}$ на число Нуссельта.

EXAMINATIONS OF HEAT TRANSFER INTENSIFICATION IN THE SHORT
VERTICAL PIPES AT DISPERSAL-ANNULAR FLOW

Summary

Paper present the results of examination of intensification of heat transfer in the short vertical pipes at dispersal-annular flow. The main examinations presented in the article [8] has been in this paper generalized for the case, when l/d evidently influences on the heat exchange ($l/d < 60$). Experimental results are presented in the form of the generalized equation taking into account the influence of l/d ratio on the Nusselt number.