ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988

Seria: ENERGETYKA z. 104 Nr kol. 973

Andrzej W. WALEWSKI
Jan CZEPELAK
Stanisław PĘKALA
Wacław WOJNAR

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska

BADANIA DOŚWIADCZALNE OPORÓW PRZEPŁYWU UKŁADÓW PĘCZKOWYCH BIMETALOWYCH RUR OŻEBROWANYCH

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań aerodynamicznych przestawnych i korytarzowych układów pęczkowych rur ożebrowanych typu RBW METALCHEM. Dla badanych typowymiarów rur podano uogólnione korelacje, umożliwiające prowadzenie obliczeń aerodynamicznych wymienników ciepła z wkładem grzewczym z rur typu RBW.

1. WPROWADZENIE

Poszukiwania coraz doskonalszych konwekcyjnych ciśnieniowych powierzchni grzewczych wymienników ciepła zmierzają w kierunku intensyfikacji wymiany ciepła, obniżenia oporów aerodynamicznych i wzrostu odporności powierzchni na korozję siarkową i atmosferyczną.

W celu spełnienia tych wymagań w technice transportu ciepła w wymiennikach typu gaz-para wodna (woda) pojawiła się konstrukcja bimetalowej rury ożebrowanej. Rura wewnętrzna wykonana jest ze stali kotłowych i jej zadaniem jest przejęcie naprężeń związanych z ciśnieniem pary. Ożebrowana rura zewnętrzna wykonana jest z aluminium.

Odpowiedni materiał, kształt i podziałka żeber oraz wysoki stopień rozwinięcia powierzchni stanowią o zaletach, które predysponują ten typ rury jako powierzchnię grzewczą intensywnych wymienników ciepła.

Do prowadzenia obliczeń takich wymienników z zastosowanym wkładem grzewczym zbudowanym z bimetalowych rur wysokożebrowanych konieczna jest znajomość korelacji dla współczynników wymiany ciepła i oporów aerodynamicznych układu pęczkowego o wybranej geometrii.

Badania wielu autorów [1, 2, 3, 4, 5, 6] dotyczyły układów pęczkowych rur o różnych parametrach charakterystyki geometrycznej, ale analiza publikowanych prac wykazała braki i rozbieżności wyników badań.

Najszersze i najbliższe zastosowaniom w energetyce są prace Ju. Stasjuljawiczjusa [2] i A.A. Żukauskasa [3].

Analiza dostępnych [1÷7, 9] publikacji wykazała zadowalającą powtarzalność i zbieżność wyników dotyczących badań wymiany ciepła, ale w sferze oporów aerodynamicznych układów pęczkowych rur ożebrowanych wyniki badań różniły się bardzo istotnie (nawet do 100%).

Ze względu na konieczność prowadzenia dokładnych obliczeń oporów czynnika gazowego wynikła konieczność sformułowania zależności empirycznych na podstawie własnych badań doświadczalnych. Badania objęły produkowane rury [8], które przewidywane są do aplikacji w przemyśle kotłowym i energetyce [10]:

1) RBW - 00 - 25 - 57 - 50,
2) RBW - 00 - 25 - 57 - 28,
3) RBW - 00 - 16 - 38 - 28.

Badanie rur typu RBW prowadzono dotychczas w bardzo ograniczonym zakresie. Jako jedyne [9] zamieszczono wyniki uzyskane w badaniach dwóch czterorzędowych układów pęczka z rur typu RBW-00-25-57-28 i RBW-00-16-38-28.

Aby zrealizować postawiony cel, przeprowadzono szerokozakresowe badania na stanowisku doświadczalnym AT-3 własnej konstrukcji. Wyniki badań empirycznych opracowano za pomocą użytkowego programu komputerowego FLOP-02 utworzonego w Komputerowym Systemie Wspomagania Badań [12]. Zbieranie danych pomiarowych, przetwarzanie danych, obliczenia, analizy i weryfikację wyników dokonywano za pomocą: IBM PC/XT TURBO SYSTEM.

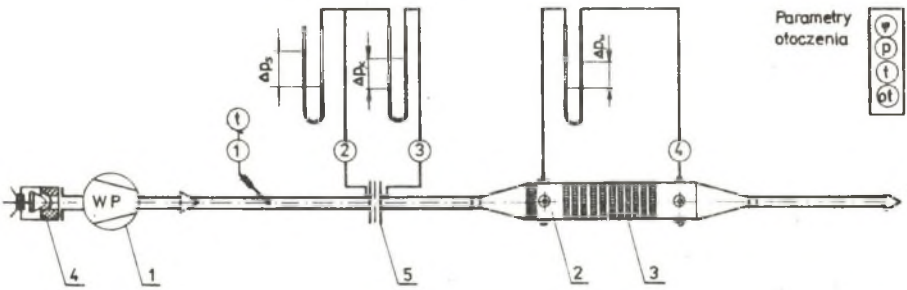
2. INSTALACJA BADAWCZA AT-3

Instalacja badawcza oporów przepływu układów pęczkowych rur ożebrowanych składa się z rurowego kanału aerodynamicznego wyposażonego w wentylator podmuchu i uniwersalnej komory pomiarowej z odpowiednio wyprofilowanymi kanałami napływowym i odpływowym. Na rys. 1 przedstawiono schemat pomiarowy stanowiska AT-3.

Wymienny wentylator podmuchu 1 (WP 28/1,25 P6 lub WP 22,4/1 P6) tłoczy powietrze atmosferyczne omywające wkład rurowy 3 umieszczony w komorze badawczej 2. Specjalna konstrukcja komory o gabarytach 500 x 305 x 1800 mm wykonanej z metapleksu pozwala na zamodelowanie dowolnego układu geometrycznego wkładu rurowego, a także obserwację strumienia powietrza (siatki wyrównawcze, nitki). Instalacja wyposażona jest w odpowiednie urządzenia regulacyjne 4 i aparaturę kontrolno-pomiarową.

Pomiary poszczególnych parametrów realizowane są za pomocą odpowiednich czujników i przyrządów:

pomiar temperatury:
- czujnik termometryczny oporowy Pt 100 Ω ze wskaźnikiem analogowym,
- termometry rtęciowe laboratoryjne,



Rys. 1. Schemat pomiarowy stanowiska doświadczalnego AT-3 do badań oporów przepływu układów pęczkowych

Fig. 1. Measurement scheme of the experimental stand AT-3 for flow resistance testing in tube banks

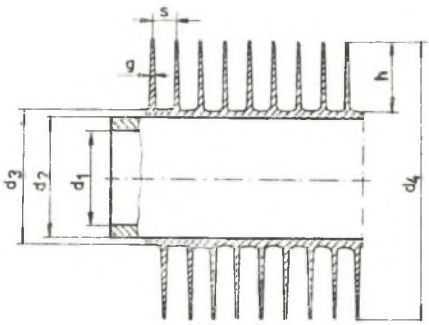
pomiar ciśnienia: - mikromanometry optyczne ASCANIA,
- barometr rtęciowy,
- barometr sprężynowy,

pomiar wilgotności: - higrometr włosowy laboratoryjny.

3. MATERIAŁY BADAWCZE

Program produkcji bimetalowych rur ożebrowanych [8] obejmuje szeroką gamę typów pod względem parametrów geometrycznych i materiałów. Analizy i badania prowadzone w ramach realizowanych problemów centralnych i resortowych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej pozwoliły na wybór niektórych rur ożebrowanych na powierzchnie grzewcze kotłowych wymienników ciepła.

Wybór dotyczy integralnych bimetalowych rur wysokożebrowanych typu RBW METALCHEM i obejmuje 3 typy rur wymienione we wprowadzeniu. W tablicy 1 przedstawiono zestawienie wymiarów, materiałów i liczby rur, z których modelowano wielorzędowe układy pęczkowe, a na rys. 2 pokazano cechy geometryczne badanej rury.



Rys. 2. Cechy geometryczne bimetalowej rury ożebrowanej

Fig. 2. Geometrical parameters of bimetallic finned tube

Tablica 1

Tablica parametrów geometrycznych badanych rur ożebrowanych

Parametr	Jednostka	Typ rury ożebrowanej		
		1	2	3
		RBW-00-25-57-50	RBW-00-25-57-28	RBW-00-16-38-28
Materiał rury rdzeniowej		K 10 II	K 10 II	K 10 II
Materiał rury żebrowej		AL 99,5	AL 99,5	AL 99,5
Średnica wewnętrzna d_1	mm	19,8	19,8	12,8
Średnica zewnętrzna d_2	mm	25	25	16
Średnica podstawy żebra d_3	mm	27	27	17
Średnica żebra d_4	mm	57	57	38
Wysokość żebra h	mm	15	15	10,5
Podziałka żebra s	mm	5,0	2,8	2,8
Grubość żebra g	mm	0,6	0,3	0,35
Długość rury l	mm	305	305	30
Ilość rur z	szt	80	75	75

4. METODYKA BADAŃ OPORÓW PRZEPŁYWU GAZU PRZEZ UKŁADY PĘCZKOWE RUR

Opory przepływu czynnika gazowego przez układ pęczkowy rur określa się wzorem:

$$\Delta p_w = Eu\ w^2 \rho\ z_2 \tag{1}$$

gdzie:

Δp_w - opór przepływu czynnika gazowego przez układ rur, Pa,
Eu - liczba Eulera określona dla jednego rzędu rur,
w - prędkość czynnika w najwęższym przekroju przestrzeni międzyrurowej, m/s,
ρ - średnia gęstość czynnika, kg/m^3,
z_2 - liczba rzędów rur.

Wartości liczby Eu zależą od cech geometrycznych rury stanowiącej pęczek oraz układu pęczka i muszą być dla każdego z parametrów określane na drodze empirycznej.

Zależności liczby Eulera Eu od warunków hydrodynamicznych przepływu czynnika gazowego opisanych liczbą kryterialną Reynoldsa Re najlepiej oddaje równanie kryterialne w postaci:

$$Eu = A\ Re^B \tag{2}$$

gdzie:

$Re = \frac{w\ d_e}{\vartheta}$ - liczba kryterialna Reynoldsa,
d_e - średnica ekwiwalentna, m. Jako średnicę ekwiwalentną układu rur ożebrowanych przyjmuje się średnicę podstawy żebra $d_e = d_3$,
ϑ - lepkość kinematyczna czynnika gazowego, m^2/s,
A, B - stałe wyznaczane doświadczalnie.

Wartości parametrów i współczynników występujących w równaniach (1) i (2) możliwe są do określenia i zmierzenia na stanowisku badawczym.

Wkład rurowy w regularnym układzie pęczkowym jest strukturą symetryczną, powtarzającą się na całej przestrzeni. Doświadczenia można zatem prowadzić na dostatecznie dużym wycinku układu będącym reprezentantem całej struktury. W tym przypadku nie występuje problem skali przy przenoszeniu wyników badań na urządzenia rzeczywiste. Badania wstępne i obserwacja strumienia czynnika pozwoliły stwierdzić, że odpowiednie kształty kanałów napływowego i odpływowego i zastosowane siatki wyrównawcze strumienia przy dobranej wielkości komory pozwoliły na eliminację wpływu ścian komory na profil strumienia powietrza. Wybór wielkości przekroju komory podyktowany był względami praktycznymi, głównie wydajnością wentylatora podmuchu. Doświadczenia wykonywane były w warunkach termicznych otoczenia.

5. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Przygotowane materiały badawcze i zbudowana instalacja doświadczalna pozwoliły na przeprowadzenie badań liczby Eulera Eu w zależności od warunków hydrodynamicznych strumienia gazu Eu = f(Re).

W komorze badawczej zamodelowano 120 układów geometrycznych przestawnych i korytarzowych pęczków z trzech typów rur ożebrowanych. Każdy układ opisany podziałką poprzeczną s_1 i wzdłużną s_2 modelowano z z_2 rzędów rur.

Wstępne badania własne [13, 14] potwierdziły wnioski z prac [2, 3, 6], że wpływ liczby rzędów z_2 rur w pęczku na wartość liczby Eulera zanika przy $z_2 > 4$. Z tego względu badania prowadzono na układach modelowych pęczków o liczbie rzędów rur $z_2 = 6 \div 10$.

Zakres geometrii ożebrowania badanych rur i układów pęczkowych wraz z ich porównaniem z badaniami przedstawionymi w literaturze zamieszczono w tablicy 2.

Tablica 2

Zestawienie parametrów geometrycznych badanych rur ożebrowanych i układów pęczka

Układ rur w pęczku	Parametr	Badania własne	Badania obce	
			wg [2, 3]	wg [6, 7]
Przestawny	σ_1	2,10÷4,44	2,20÷4,13	nie podano
	σ_2	1,84÷4,21	1,30÷2,35	nie podano
	h	10,5 15	4 6 9 10	
	s	2,8 5	4 6 8	
	ε	10,5 12,5 17,8	1,9÷16,0	
	l/d_e	1,8÷11,0	-	0,16-6,55
Korytarzowy	σ_1	2,10÷4,21	2,38÷3,13	nie podano
	σ_2	2,10÷4,44	1,2÷2,35	nie podano
	$\frac{\sigma_2-1}{\sigma_1-1}$	0,45÷2,85	-	0,5÷2,0
	ε	10,5 12,5 17,8	1,9÷16,0	nie podano
	l/d_e	1,8÷11,0	-	0,8÷11,5

Do opisu parametrów geometrycznych użyto poniższych oznaczeń:

$\sigma_1 = \frac{s_1}{d_3}$ - podziałka poprzęczna względna,

$\sigma_2 = \frac{s_2}{d_3}$ - podziałka wzdłużna względna,

s_1 - podziałka poprzeczna rur w pęczku, mm,

s_2 - podziałka wzdłużna rur w pęczku, mm,
d_3 - średnica podstawy żebra, mm,
ε - stopień rozwinięcia powierzchni,
l - charakterystyczny wymiar liniowy [5, 6], m,
d_e - średnica ekwiwalentna przestrzeni międzyżebrowej w układzie pęczka [5, 6], m.

Eksperymenty przeprowadzono w zakresie liczb kryterialnych $1000 < Re < 17\,000$. Dobrany zakres liczby Re odpowiada poszerzonemu zakresowi prędkości czynników gazowych w wybranych wymiennikach ciepła. Wielokrotnie powtarzane doświadczenia cechowała 92÷95% powtarzalność wyników pomiarów.

Obliczenia wartości współczynników doświadczalnych równania (2) dokonuje się metodą najmniejszych kwadratów. Wartości liczby Eu przelicza się na 1 rząd rur.

Wyniki badań oporów przepływu układu dla jednej rury, określonej podziałki poprzecznej s_1 i wzdłużnej s_2 i różnej liczby rzędów rur $z_2 = 6 \div 10$ aproksymowano łącznie. Tak opracowane wyniki mogą być prezentowane w postaci graficznej zależności kryterialnej $Eu = f(Re)$ i w układzie współrzędnych podwójnie logarytmicznych przedstawiają pęk prostych.

W celu przedstawienia wyników badań w formie przydatnej do obliczeń aerodynamicznych wymiennika ciepła zależności te uogólniono dla każdego z badanych typów rur.

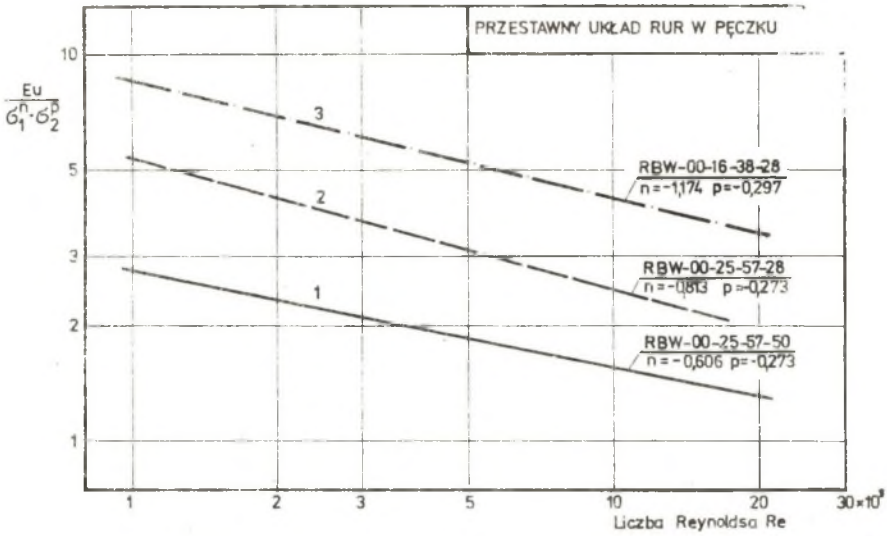
6. KORELACJE UOGÓLNIONE DO OBLICZEŃ AERODYNAMICZNYCH UKŁADÓW PĘCZKOWYCH RUR OŻEBROWANYCH

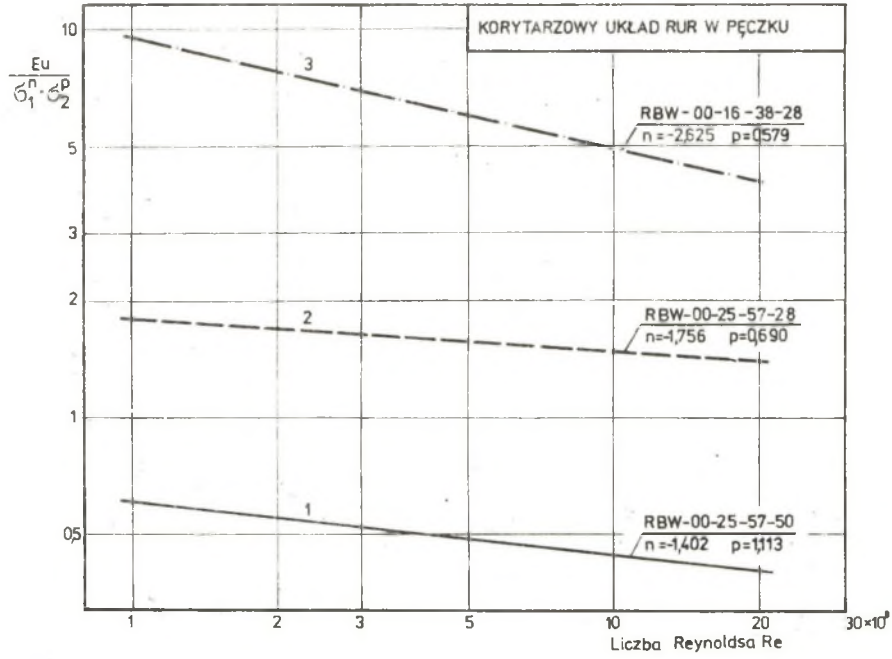
W celu uogólnienia wyników badań doświadczalnych dla różnych stosowanych układów geometrycznych rur ożebrowanych wyznaczono współczynniki regresji dla korelacji pomiędzy zmiennymi Eu, Re, s_1, s_2, d_3 w postaci

$$Eu = C\, Re^m \left(\frac{s_1}{d_3}\right)^n \left(\frac{s_2}{d_3}\right)^p \tag{3}$$

Taka postać zależności stosowana jest w literaturze [3] do opisu wyników eksperymentów dla pęczków w układzie przestawnym. Wyniki badań pęczków w układach korytarzowych wykazują duże podobieństwo do odpowiednich wyników badań układów przestawnych, zatem przyjęto tę postać korelacji dla obu odmian pęczka rur.

Współczynniki regresji C, m, n, p wyznaczono metodą liniowej regresji wielokrotnej [15], a zestawienie wartości współczynników dla układu przestawnego i korytarzowego badanych rur ożebrowanych zamieszczono w tablicy 3. W kolumnie 6 tej tablicy prezentuje się wartości współczynnika korelacji wielokrotnej R. Współczynnik ten służy do określenia istotności korelacji.





Rys. 3. Zależność liczby Eu od warunków hydrodynamicznych strumienia gazu dla przestawnego i korytarzowego układu pęczka z rur RBW METALCHEM

Fig. 3. Dependence of Euler number on gas flux hydrodynamic conditions (Reynolds number) for staggered and in-line arrangement of finned RBW METALCHEM tube banks

Tablica 3

Zestawienie wartości współczynników regresji w korelacji $Eu = C\ Re^m (s_1/d_3)^n (s_2/d_3)^p$ dla badanych układów pęczkowych rur ożebrowanych

Typ rury	Współczynniki regresji				Współczynnik korelacji R	Wartość testu F
	C	m	n	p		
1	2	3	4	5	6	7
Przestawny układ rur w pęczku						
RBW-00-25-57-50	17,160	-0,2605	-0,6055	-0,2727	0,955	925
RBW-00-25-57-28	54,98	-0,3359	-0,8130	-0,2734	0,986	3335
RBW-00-16-38-28	68,58	-0,3016	-1,174	-0,297	0,984	2442
Korytarzowy układ rur w pęczku						
RBW-00-25-57-50	1,548	-0,1366	-1,402	1,113	0,901	382
RBW-00-25-57-28	3,292	-0,0867	-1,756	0,690	0,875	309
RBW-00-16-38-28	69,52	-0,286	-2,625	0,579	0,973	1051

Dla wartości R zamieszczonych w tablicy 3, kolumna 6, można przyjąć, że wszystkie korelacje są istotne [13].

Do oceny istotności korelacji służy również test F (wartości P dla poszczególnych zależności podaje tablica 3, kolumna 7). Dla 3 zmiennych niezależnych i liczby punktów pomiarowych powyżej 200 wartość F dla prawdopodobieństwa P = 0,01 wynosi F = 3,80 [15], a wartości F wyliczone dla przedstawionych korelacji są o kilka rzędów wyższe. Przyjęte korelacje są zatem wysoce istotne.

Otrzymane na drodze eksperymentu wyniki zilustrowano w postaci wykresów na rys. 3, gdzie dla obu układów rur w pęczku, odrębnie dla każdego typu rury, przedstawiono korelację (3) przekształconą do postaci:

$$\frac{Eu}{\sigma_1^n \sigma_2^p} = C\ Re^m \tag{4}$$

7. DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI Z BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Badania aerodynamiczne przestawnych układów pęczkowych rur ożebrowanych są obszernie prezentowane w literaturze fachowej, ale rury poddane badaniom mają inne parametry geometryczne ożebrowania, a wyniki uzyskane przez różnych badaczy różnią się znacznie. Światowe badania układów korytarzowych prowadzone były w wąskim zakresie i są niepełne. Wyniki własnych obliczeń kontrolnych prowadzonych na podstawie podawanych przez różnych autorów zależności różnią się jeszcze bardziej niż dla układów przestawnych i dochodzą do 80-100%.

Dotychczasowe szczątkowe badania rur typu RBW nie pozwalają na prowadzenie obliczeń oporów aerodynamicznych.

Celem prac eksperymentalnych zespołu badawczego było przeprowadzenie rozszerzonych badań aerodynamicznych pęczków rur ożebrowanych typu RBW o geometrii właściwej potrzebom zastosowań energetycznych.

Analiza wyników własnych badań doświadczalnych pozwoliła na opracowanie uniwersalnych korelacji do obliczeń oporów przepływu układów pęczkowych rur ożebrowanych w postaci

$$Eu = C\, Re^{m}\, \sigma_1^{n}\, \sigma_2^{p} \tag{5}$$

Odpowiednie współczynniki zestawiono w tablicy 3. Podane korelacje ważne są w zakresie liczb $Re = 1\,000 \div 17\,000$.

Uzyskane w badaniach własnych wartości liczby Eulera Eu są wyższe od analogicznych wartości wyliczonych na podstawie zależności podanych w [2, 3, 4, 5, 6]. Stwierdzono również większy wpływ liczby Reynoldsa Re na wartości liczby Eulera, szczególnie dla układów korytarzowych. I tak dla układów przestawnych w zależności od typu rury współczynnik m przyjmuje wartości $m = -0{,}261 \div 0{,}336$, a w pracach [2, 3, 4, 5, 9] podano $m = -0{,}24 \div -0{,}29$.

Dla układów korytarzowych m w zależności od typu rury wynosi $m = -0{,}087 \div -0{,}286$, podczas gdy w zależności podanej w [3] $m = 0$, a w zależności w [6] $m = -0{,}08$.

Należy pamiętać, że wyniki badań innych autorów dotyczą rur o innym współczynniku rozwinięcia powierzchni oraz obejmują szerszy zakres liczb Reynoldsa.

Na wyniki badań ma również wpływ konstrukcja rury i technologia produkcji.

Przeprowadzona weryfikacja obliczeniowa korelacji opracowanej na podstawie własnych badań wykazała dobrą zgodność wyników dla korelacji uogólnionych z wynikami badań dla szczegółowych cech geometrycznych pęczków rur.

Przedstawione zależności jako finalny efekt badań doświadczalnych mogą bezpośrednio służyć do obliczeń aerodynamicznych wymienników ciepła z wkładem grzewczym z rur ożebrowanych typu RBW METALCHEM.

LITERATURA

1. Hobler R.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1979.
2. Stasjuljawiczjus Ju., Skrinska A.: Tiepłootdacza popierieczno obtiekajemych puczkow riebristych trub. Izdatielstvo MINTIS, Vilnus 1974.
3. Żukauskas A.A.: Konwiektiwnyj pierienos w tiepłoobmiennikach. Izdatelstwo NAUKA. Moskwa 1982.
4. Pietrowski J.W., Fastowski W.G.: Współczesne wysokosprawne wymienniki ciepła. WNT, Warszawa 1964.

5. Lokszin W.A., Fomina W.N.: Obobszczienie matieriałow po eksperimentalnomu issledowaniju soprotiwlenij riebristych puczkow trub. "Tiepłoeniergietika" 1978, nr 6.

6. Idelczyk I.E.: Sprawocznik po gidrawliczeskim soprotiwlenijam. Maszynostrojenie. Moskwa 1975.

7. Aerodinamiczeskij rasczet kotielnych ustanowok. (Normatiwnyj mietod). Pod redakcją S.I. Moczana. Eniergija. Leningrad 1977.

8. ZUCh METALCHEM w Kędzierzynie-Koźlu: Integralne rury żebrowane. Katalog firmowy. Kędzierzyn-Koźle 1986.

9. Krupiczka R., Walczyk H., Przybyła J.: Badania przepływowo-cieplne bimetalowych rur ożebrowanych produkcji krajowej. "Inżynieria i Aparatura Chemiczna" 1978, nr 6.

10. Badania rozwiniętych ciśnieniowych powierzchni wymiany ciepła w aspekcie możliwości zastosowania na elementy kotłów. Problem Resortowy R.I.5 Temat 08.11. Gliwice 1984. Materiał nie publikowany.

11. Analiza badań wymiany ciepła i oporów przepływu w pęczkach rur ożebrowanych i uściślenie metodyki obliczania powierzchni ogrzewanych z wysokożebrowanych rur bimetalowych. Problem Resortowy MNiSzW Nr R.I.5. Gliwice 1985. Materiał nie publikowany.

12. Komputerowy system wspomagania badań. Program obliczeniowy oporów przepływu układów pęczkowych rur ożebrowanych. IMiUE Politechnika Śląska, Gliwice 1986.

13. Badanie doświadczalne oporów przepływu układów pęczkowych bimetalowych rur wysokożebrowanych. Centralny Program Badań Podstawowych nr 02.18 kier. 2. Gliwice 1986. Materiał nie publikowany.

14. Badania oporów przepływu korytarzowych układów pęczkowych rur ożebrowanych. Opracowanie uogólnionych formuł empirycznych do obliczeń aerodynamicznych układów pęczkowych rur ożebrowanych. Centralny Program Badań Podstawowych nr 02.18 kier. 2. Gliwice 1987. Materiał nie publikowany.

15. Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1965.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pietrzyk

Wpłynęło do redakcji w marcu 1988 r.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЧКОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕБРИСТЫХ ТРУБ

Р е з ю м е

В настоящей статье представлены результаты аэродинамических исследований шахматных и коридорных пучков ребристых труб типа РББ МЕТАЛЬХЕМ.

Даны обобщенные формулы для аэродинамических расчётов теплообменников с поверхностями нагрева из ребристых труб типа РББ.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON FLOW RESISTANCE
OF BIMETALLIC FINNED TUBE BANKS

S u m m a r y

Results of aerodynamic testing of staggered and in-line banks of bimetallic finned RBW METALCHEM tubes have been presented in this paper.

General equations for calculation of pressure drop of gas flowing across tube banks in heat exchangers with tested RBW tubes have been derived.