

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**ADAM KLACZAK**

**WYMIANA CIEPŁA  
PRZY PRZEPLYWIE LAMINARNYM  
W RURZE PIONOWEJ  
PODDANEJ DRGANIOM**

**ENERGETYKA**

**Z. 129**

**GLIWICE  
1998**

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**ZESZYTY NAUKOWE**

Nr 1386

**ADAM KLACZAK**

**WYMIANA CIEPŁA  
PRZY PRZEPIYWIE LAMINARNYM  
W RURZE PIONOWEJ  
PODDANEJ DRGANIOM**

## OPINIODAWCY

Prof. zw. dr hab. inż. Tadeusz Pawlik

Dr hab. inż. Joachim Koziół - Profesor nadzw. Politechniki Śląskiej

## KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY - Prof. dr hab. Zygmunt Kleszczewski

REDAKTOR DZIAŁU - Dr hab. inż. Andrzej Witkowski  
Profesor Politechniki Śląskiej

SEKRETARZ REDAKCJI - Mgr Elżbieta Leško

## REDAKCJA

Mgr Aleksandra Kłobuszowska

## REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9796

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

---

Nakład 110+83 egz. Ark. wyd. 6. Ark. druk. 4,125. Papier offset. kl. III 70x100 80 g  
Oddano i podpisano do druku 13.05.1998 r. Druk ukończono w maju 1998 r.  
Zam. 21/98

---

Skład, fotokopie, druk i oprawę wykonano w UKiP sc, Gliwice, ul. Pszczyńska 44

## Spis treści

	str.
Oznaczenia .....	5
Część I .....	7
Przegląd wyników badań przeprowadzonych w latach 1993-1997 .....	7
Część II .....	16
Badania przeprowadzone przez autora .....	16
1. Cel i zakres badań .....	16
2. Stanowisko badawcze .....	17
3. Tunel aerodynamiczny .....	21
4. Pomiar temperatury .....	24
5. Pomiar przepływu .....	31
6. Założenia przyjęte do obliczeń .....	32
7. Ocena błędu pomiarów .....	33
8. Pomiary wymiany ciepła w rurze doświadczalnej w spoczynku (bez drgań) .....	34
9. Pomiary wymiany ciepła w rurze doświadczalnej poddanej drganiom .....	37
10. Opis procesu wymiany ciepła w przepływie laminarnym przy użyciu liczby (Gz) .....	51
11. Podsumowanie i wnioski .....	56
Literatura .....	59
Streszczenia .....	62

## Table of contents

	page
Nomenclature .....	5
Part 1 .....	7
Review of research executed in years 1993-1997 .....	7
Part II .....	16
Autors investigation .....	16
1. Purpose and range of investigation .....	16
2. Experimental stand .....	17
3. Wind-tunnel .....	21
4. Measurements of temperature .....	24
5. Measurements of flow .....	31
6. Assumptions adopted to calculations .....	32
7. Estimation of measurement error .....	33
8. Measurements of heat transfer in test pipe without vibrations .....	34
9. Measurements of heat transfer in test pipe exposed to vibrations .....	37
10. Description of heat transfer by laminar flow and use of (Gz) number .....	51
11. Results and conclusions .....	56
References .....	59
Summary .....	62

## Oznaczenia

a	amplituda	[mm]; [cm]; [m]
A	amplituda $A = 2a$	[mm]; [cm]; [m]
c	ciepło właściwe	$\left[ \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$
C	stała w równaniu	
d	średnica	[mm]; [cm]; [m]
f	częstotliwość drgań	$[\text{s}^{-1}]$ ; [Hz]
F	powierzchnia wymiany ciepła	$[\text{m}^2]$
g	przyspieszenie siły przyciągania ziemi 9,81	$\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$
L; H	wymiar długości, wymiar wysokości	[mm]; [cm]; [m]
t	temperatura	$[\text{°C}]$ ; $[\text{°K}]$ ;
Q	Moc cieplna	$\left[ \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right]$ ; (W)
V	natężenie przepływu objętości	$\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$
v	średnia prędkość przepływu	$\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

### Liczby bezwymiarowe

Re	liczba Reynoldsa $Re = \frac{vd}{\nu}$	
Nu	liczba Nusselta $Nu = \frac{dx}{\lambda}$	
Nu <sub>p</sub>	dla przepływu z drganiami	
Pr	liczba Prandtla $Pr = \frac{c_p \rho}{\lambda}$	
Gz	liczba Graetz $Gz = \frac{\pi d}{4L} Pr Re$ dla rury	
Gr	liczba Grashofa $Gr = \frac{g \beta \Delta T H^3 \rho^2}{\eta^2}$	
Ka	liczba określająca wpływ częstotliwości drgań $Ka = \frac{d^2 f}{\nu}$	

### Oznaczenia greckie

$\alpha$	współczynnik przejmowania ciepła z indeksem (p) dla przepływu z drganiami	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
$\beta$	współczynnik rozszerzalności objętościowej, lub bezwymiarowa wielkość pomocnicza	$\left[ \frac{1}{K} \right]$
$\rho$	gęstość	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$\lambda$	współczynnik przewodzenia ciepła	$\left[ \frac{W}{mK} \right]$
$\nu$	kinematyczny współczynnik lepkości	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
$\eta$	lepkość dynamiczna	$\left[ \frac{Ns}{m^2} \right]$

## C z ę ś ć I

### Przegląd wyników badań przeprowadzonych w latach 1993 - 1997

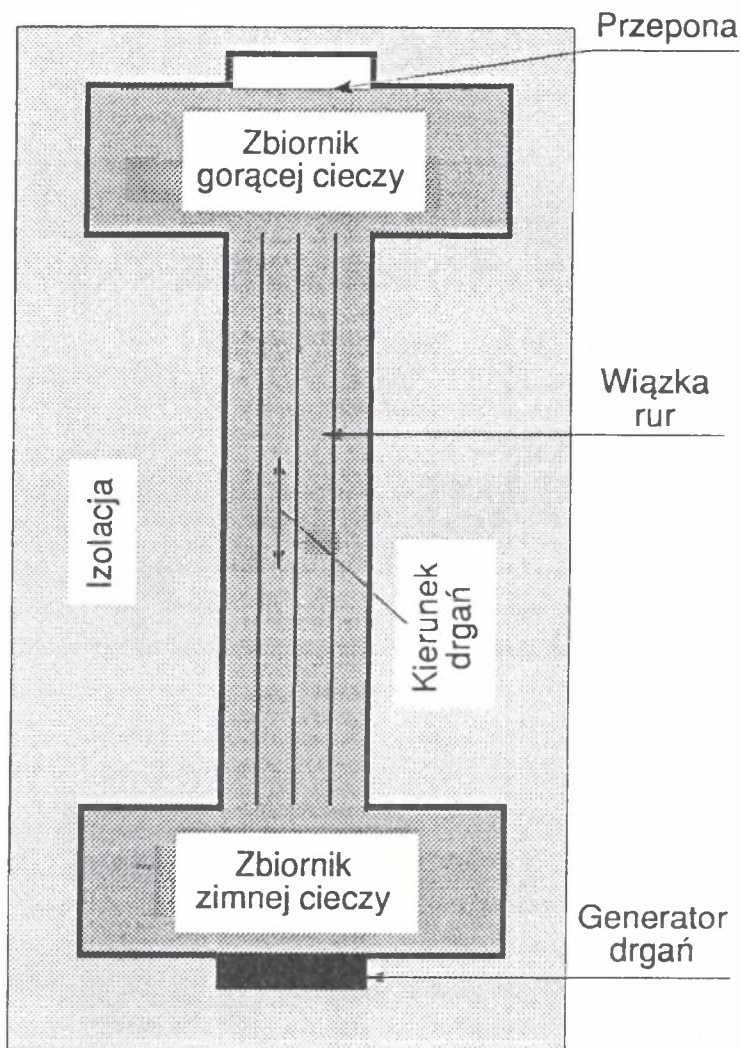
Praca niniejsza jest kontynuacją pracy "Interpretacja wpływu drgań wymuszonych i samowzbudnych na wymianę ciepła" wydanej przez Politechnikę Krakowską w zeszycie naukowym nr 4 w roku 1994. Badania autora nad wpływem drgań wymuszonych na wymianę ciepła opublikowane w wymienionej pracy były kontynuowane dla wymiennika para-woda poddanego drganiom. Wysłunięto wówczas hipotezę, że zwiększając amplitudę drgań można uzyskać znaczący wzrost wymiany ciepła przy przepływie laminarnym. W pracy niniejszej postanowiono sprawdzić słuszność tej hipotezy.

O zainteresowaniu tematem wpływu drgań na wymianę ciepła świadczy duża liczba prac na ten temat publikowanych w czasopismach naukowych. W pracy niniejszej omówiono jedynie niektóre badania przeprowadzone w ostatnich latach, ponieważ wcześniejsze zostały omówione w pracy wyżej wymienionej.

W ostatnich latach zaobserwować można powrót zainteresowania badaniami przepływu ze zmienną prędkości (pulsacyjnego) [1, 7, 9, 18, 24, 25, 31]. Prowadzone są również prace, w których badany jest wpływ pulsacyjnego ogrzewania [2] lub pulsacyjnego pola temperatur [6]. Charakterystyczny jest również fakt, że coraz więcej autorów w swoich pracach wykorzystuje eksperyment, porównując jego wyniki z analizą numeryczną. Poniżej omówiono niektóre prace badawcze z ostatnich lat:

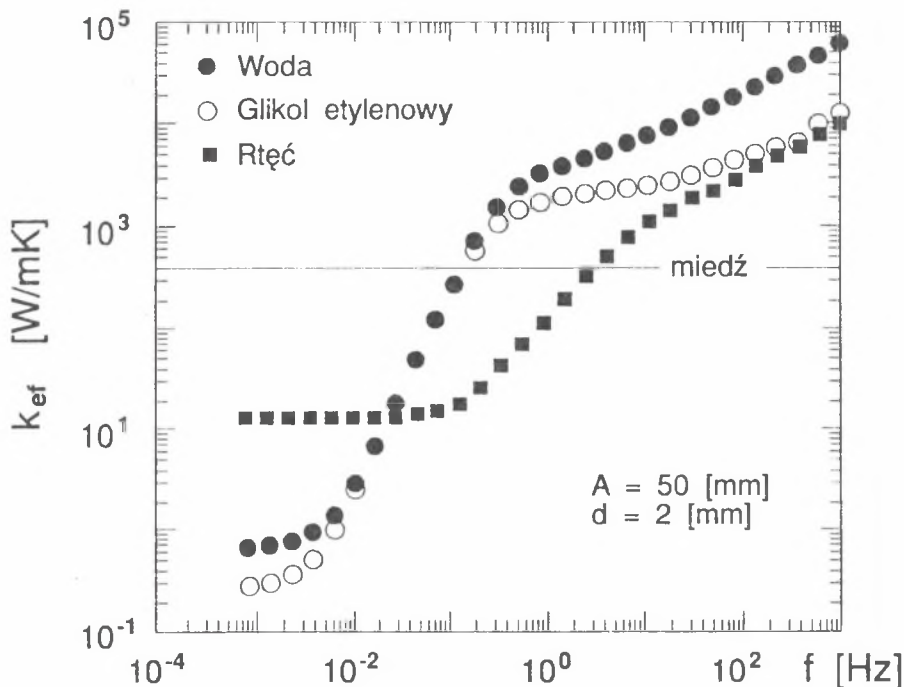
**Rok 1995. Shigefumi Nishio, Xiao-Hong Shi, Wei-Min Zhang** [21] badali efektywność wymiany ciepła (transportu ciepła) między zbiornikami z ciepłym i zimnym płynem. Zbiorniki połączone były pionowymi rurami. Zbiornik z ciepłym płynem był nad zbiornikiem z płynem zimnym. Cały układ poddany był drganiom. Na rysunku 1.1. pokazano schemat układu wymiany ciepła.





Rys. 1.1. Schemat układu drgającego  
 Fig. 1.1. Diagram of the vibrating system

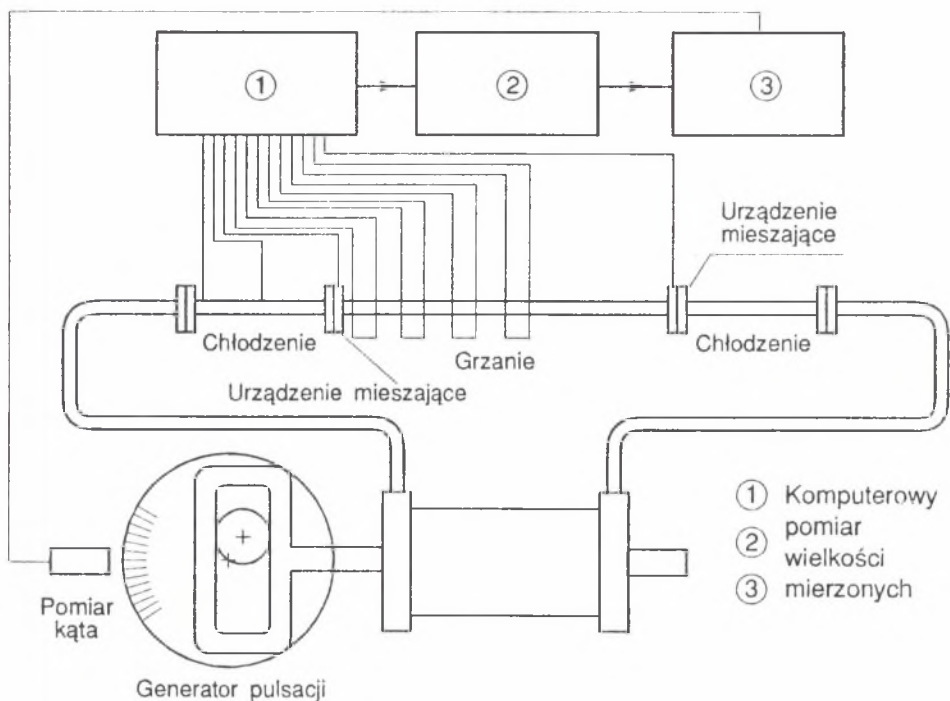
Drgania powodują szybsze wyrównanie temperatury płynu między zbiornikami. Na skutek wzmożonej dyfuzji masy powiększa się efektywny współczynnik przewodzenia ciepła ( $k_{ef}$ ). Na rys. 1.2. pokazano zależność  $k_{ef} = f(f)$ .



Rys. 1.2. Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła w funkcji częstotliwości  
 Fig. 1.2. Effective thermal conductivity coefficient as function of frequency

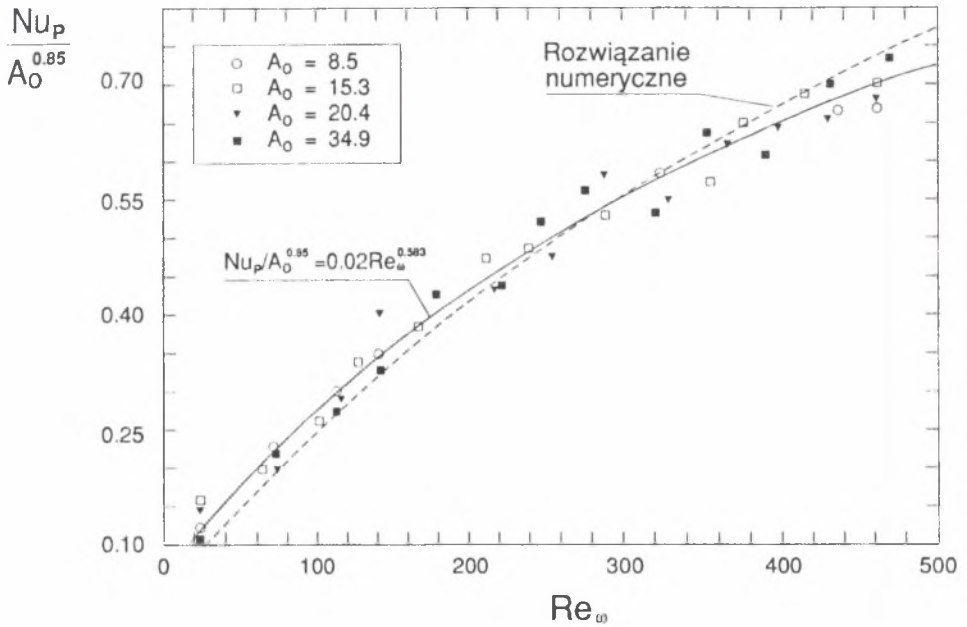
Wzrost całkowitego efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła dla wody, glikolu etylenowego i rtęci jest zależny w dużym stopniu od częstotliwości drgań i amplitudy. Im wyższa częstotliwość i amplituda drgań, tym większy całkowity efektywny współczynnik przewodzenia ciepła.

**Rok 1996. Zhao T.S., Cheng P.** [30] przeprowadzili eksperymentalne i numeryczne studium wymiany ciepła między laminarnym pulsującym przepływem powietrza a ogrzaną stałym strumieniem ciepłą rurą. Pulsowała określona ilość powietrza raz grzana, raz chłodzona. Pulsacje wymuszone były tłokiem pompy powietrznej. Na końcach rury ogrzewanej była mierzona temperatura. Aparaturę badawczą pokazano na rysunku 1.3, a wyniki pomiarów oraz obliczeń numerycznych - na rysunku 1.4.



Rys. 1.3. Schemat aparatury badawczej  
 Fig. 1.3. Diagram of the apparatus

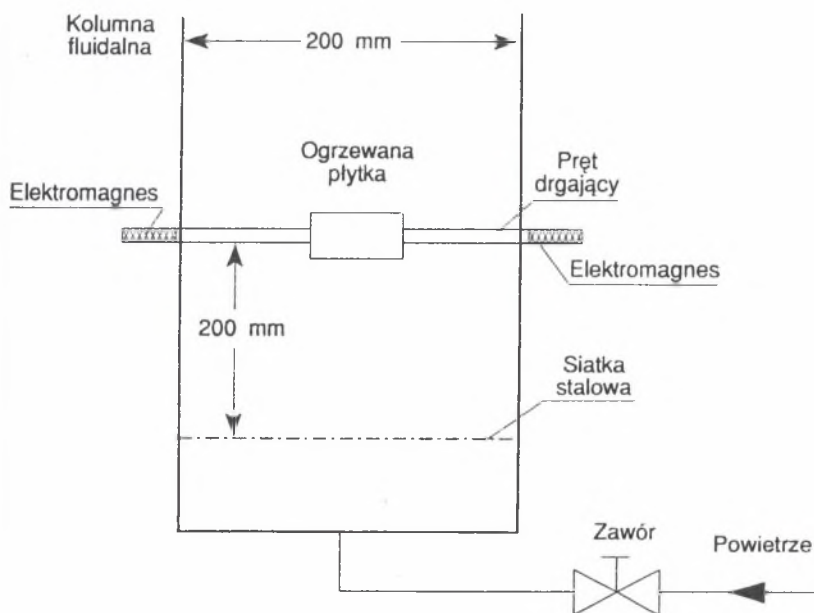
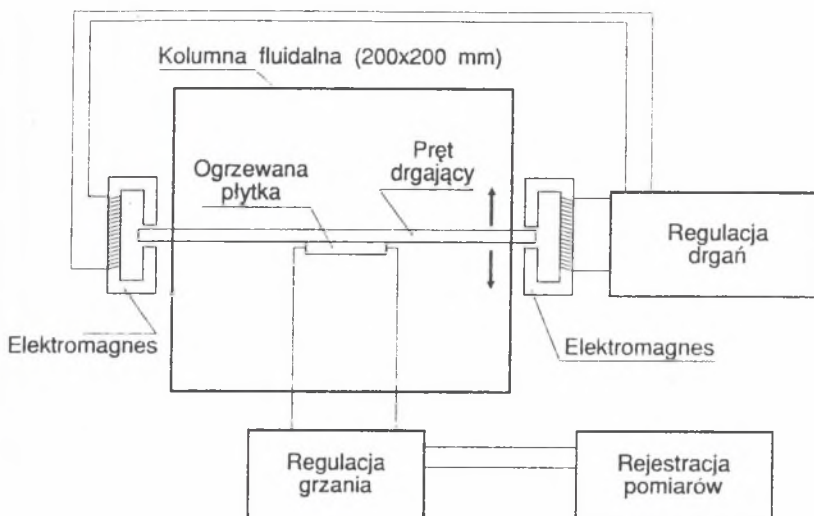
Na rys. 1.4. ( $A_0$ ) jest bezwymiarową amplitudą drgań  $A_0 = \frac{a}{d}$ . Wyniki pomiarów i obliczeń są bardzo podobne. Wynika z nich, że amplituda pulsacji ma duży wpływ na wymianę ciepła. Decydujący wpływ na wymianę ciepła ma liczba ( $Re_\omega$ ) uwzględniająca częstotliwość drgań.



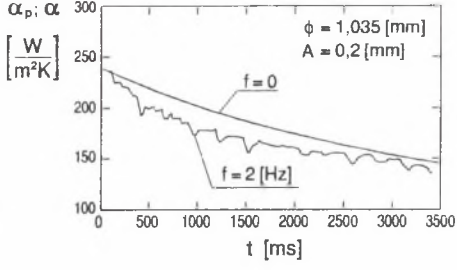
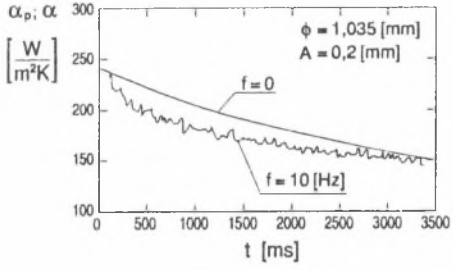
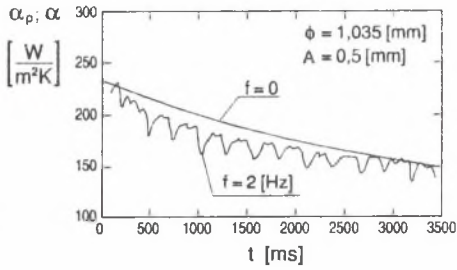
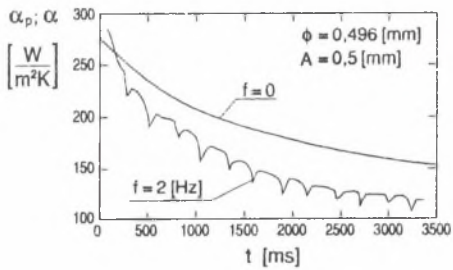
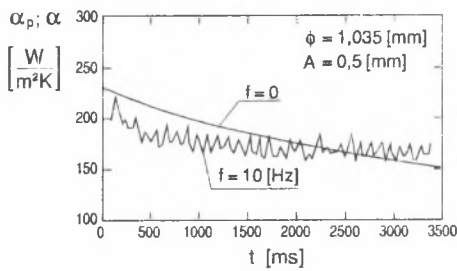
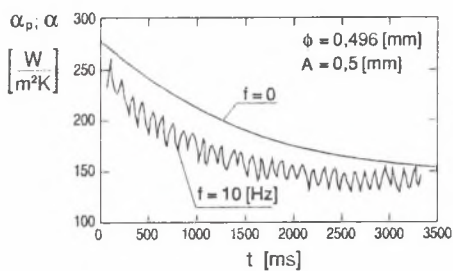
Rys. 1.4. Rozrzut punktów pomiarowych w porównaniu z obliczeniami uzyskanymi za pomocą analizy numerycznej  
 Fig. 1.4. Dispersion of measuring points in comparison with numerical study

**Rok 1997. Du C., Turton R.** [4] badali wymianę ciepła między drgającą ogrzaną do temperatury 60°C płytką a złożem fluidalnym wypełnionym kulkami szklanymi o średnicy 0,436 i 1,035 [mm]. Przez złożo przepuszczono powietrze o temperaturze i ciśnieniu otoczenia z prędkością 0,158 i 0,586 [m/s]. Badano wpływ drgań na współczynnik oddawania ciepła między drgającą powierzchnią a złożem fluidalnym. Na rysunku 1.5. pokazano aparaturę badawczą.

Badania przeprowadzono dla częstotliwości 0, 2, 6, 10 [Hz] oraz amplitudy 0,2 i 0,5 [mm]. Wyniki badań pokazano na rysunku 1.6.



Rys. 1.5. Schemat stanowiska badawczego  
 Fig. 1.5. Schematic diagram of experimental stand



Rys. 1.6. Współczynnik wnikania ciepła ( $\alpha_p$  i  $\alpha$ ) w czasie drgań i spoczynku gorącej płytki  
 Fig. 1.6. Heat transfer coefficients ( $\alpha_p$  and  $\alpha$ ) during vibrations and without vibrations of the hot plate

Wyniki badań wpływu drgań ogrzanej płytki w złożu fluidalnym porównano do wymiany ciepła między ogrzaną płytką w spoczynku. Drgania miały dodatni wpływ na wymianę ciepła tylko w przypadku kulek o średnicy 1,035 [mm], amplitudzie drgań 0,5 [mm] i częstotliwości 10 [Hz]. W pozostałych zbadanych przypadkach drgania pogorszyły wymianę ciepła.

**Rok 1997. Chin-Hsiang Cheng, Jing-Lia Hong** [3] badali wymianę ciepła między drgającym ogrzonym cylindrem a strumieniem powietrza. Studium numeryczne porównali z wynikami doświadczeń uzyskując dobrą zgodność wyników.

Studium numeryczne przeprowadzono w zakresie:

$$0 \leq Re \leq 300$$

$$Pr = 0,71 \text{ i } Pr = 7,0$$

$$0 \leq \frac{a}{d} \leq 0,7$$

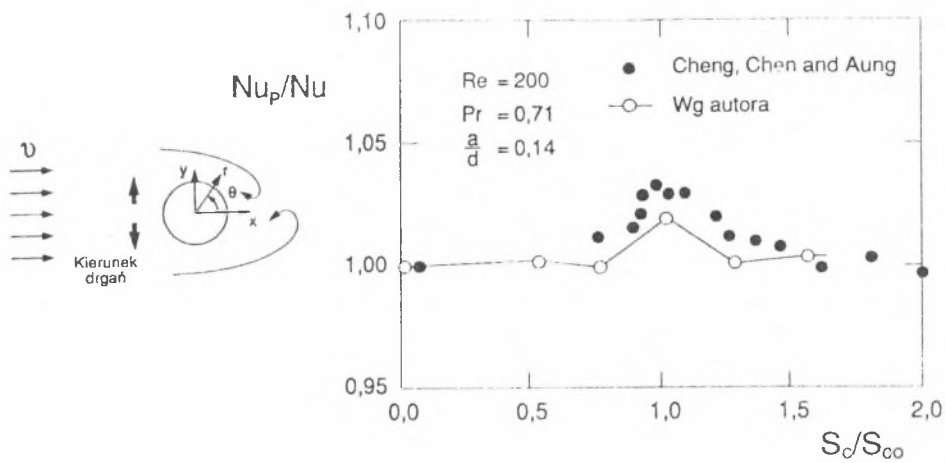
$$0 \leq S_c \leq 0,3$$

gdzie:  $S_c$  jest bezwymiarową częstotliwością drgań cylindra:

$$S_c = \frac{fd}{v}$$

Przy określonych drganiach cylindra i prędkości przepływu powietrza zaobserwowano rezonans między drgającym cylindrem a opływającym powietrzem (lock-on resonance). W tych warunkach zaobserwowano wzrost wymiany ciepła.

Na rysunku 1.7. ( $S_{CO}$ ) oznacza maksymalną bezwymiarową częstotliwość drgań w rejonie "lock-on".



Rys. 1.7. Efekt zamknięcia (Lock-on) jako funkcja wzrostu wymiany ciepła  
 Fig. 1.7. Lock-on effect as function of the increase of heat transfer



## C z ę ś ć II

### Badania przeprowadzone przez autora

#### 1. Cel i zakres badań

Badania wpływu drgań wymuszonych na wymianę ciepła, opisane w tej pracy, są kontynuacją badań autora [11].

Badania wykonane pierwotnie [11] dowiodły, że przy określonej częstotliwości i amplitudzie, jeśli przepływ jest laminarny, drgania mogą pogarszać wymianę ciepła. Wysunięto również hipotezę, że większe amplitudy i częstotliwości mogą poprawić wymianę ciepła. Celem niniejszej pracy jest zbadanie słuszności tej hipotezy.

Zbudowano stanowisko badawcze, gdzie pionową rurę poddano drganiom w zakresie:

$$0,3 \leq A \leq 3,0 \text{ [mm]}$$

$$30 \leq f \leq 150 \text{ [Hz]}$$

W pracy [11] drganiom poddany był cały wymiennik ciepła. Obecnie drganiom poddano jedynie powierzchnię wymiany ciepła. Jako medium oddające ciepło użyto wody. W wymienniku ciepła [11] woda ogrzewana była parą wodną nasyconą, w przypadku drugim woda chłodzona była strumieniem powietrza. Woda w rurze doświadczalnej płynęła z góry ku dołowi, eliminując w ten sposób do minimum wpływ konwekcji naturalnej.

Badania przeprowadzono w zakresie przepływu laminarnego:

$$120 \leq Re \leq 1500$$

Analizując badania wykonane poprzednio można było sądzić, że im mniejsza liczba ( $Re$ ), tym wpływ drgań będzie większy. Dlatego badania te wykonano dla mniejszych liczb ( $Re$ ) niż w pracy [11].

W czasie badań nie stwierdzono rezonansu układu wymiany ciepła z okresem drgań wymuszonych. Badany model wymiany ciepła był zbliżony do rozwiązań spotykanych w praktyce konstrukcyjnej.

Badania tego typu są od dłuższego czasu prowadzone przez wiele ośrodków badawczych, mają bowiem duże znaczenie w konstrukcji wielu rodzajów maszyn. Przykłady tych badań podane w pracy [11] pozwalają na wyrobienie poglądu, że wymiana ciepła między drgającym elementem a otoczeniem będącym w spoczynku lub ruchu, jest trudno przewidywalna i zależy w dużym stopniu od konstrukcji elementu drgającego.

## 2. Stanowisko badawcze

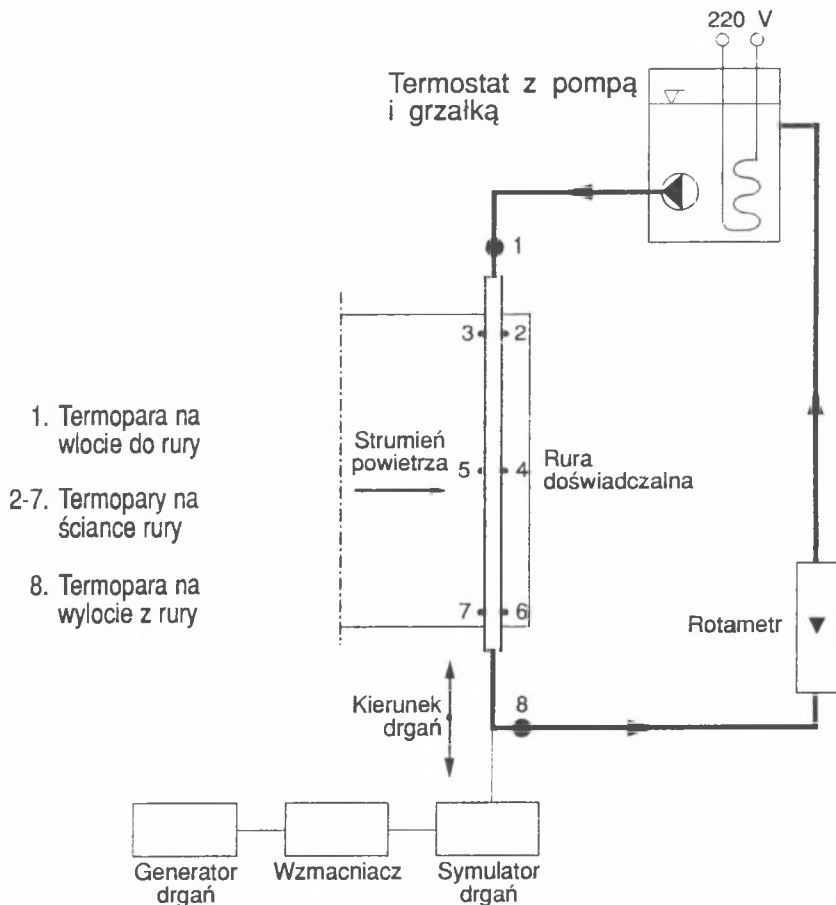
Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys. 2.1.

Pionowa rura miedziana o wymiarach:

a - średnica wewnętrzna 6,8 [mm],

b - grubość ścianki rury 0,5 [mm],

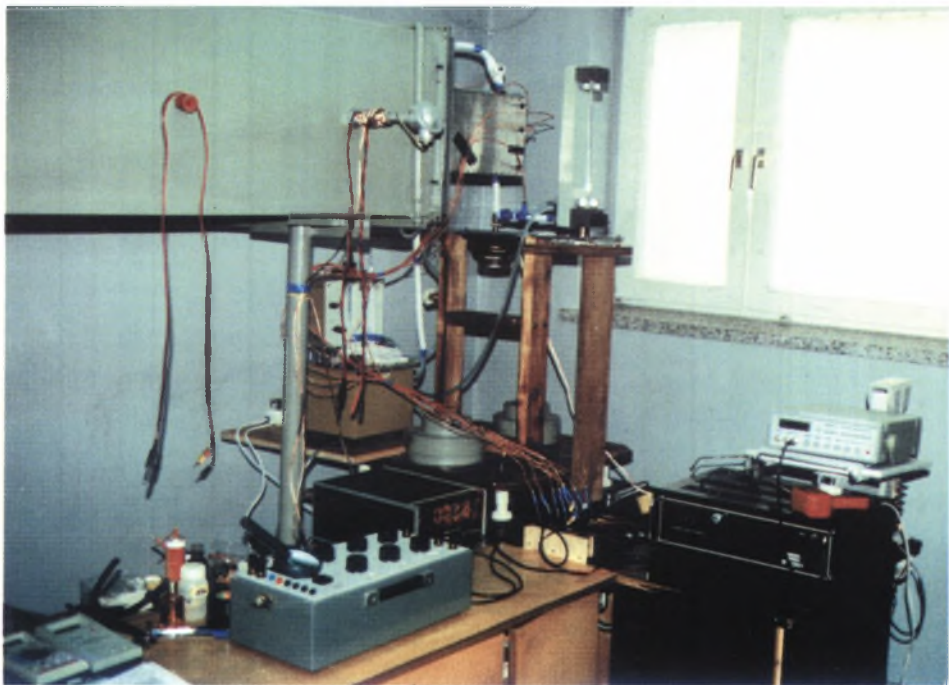
c - długość rury  $L = 30 d$  204 [mm],



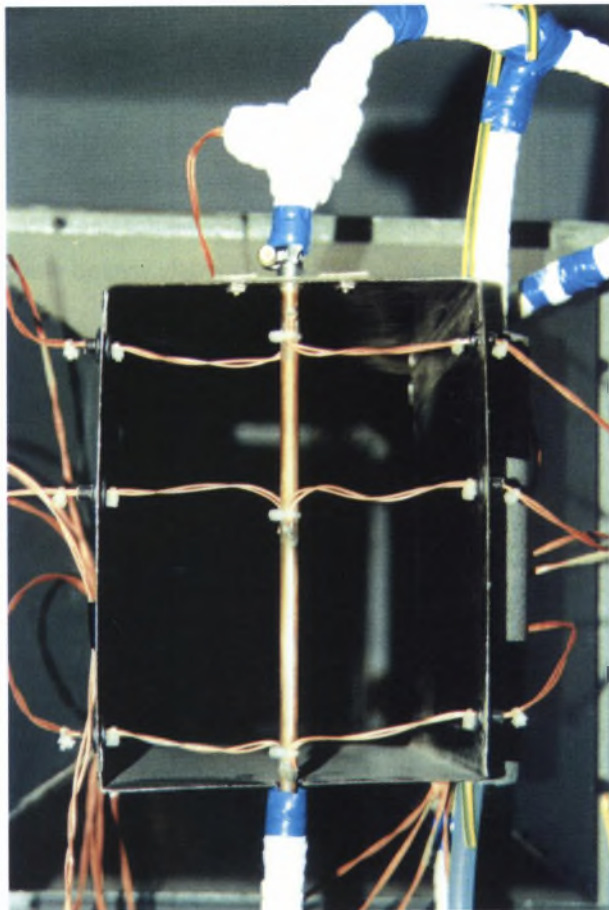
Rys. 2.1. Schemat stanowiska badawczego  
 Fig. 2.1. Vibrating system diagram

umieszczona została w tunelu aerodynamicznym. Elektrodynamiczny symulator drgań wprawiał rurę w drgania pionowe o kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu. W rurze woda była chłodzona strumieniem powietrza o temperaturze  $20 \pm 23^\circ\text{C}$ . Temperatura wody na wejściu do rury wynosiła  $80 \pm 86^\circ\text{C}$ . Termostat o mocy 1,72 kW utrzymywał wodę w temperaturze  $87^\circ\text{C}$ . Różnica temperatury wody między termostatem a wlotem do rury wynikała ze schłodzenia wody na odcinku termostat - punkt pomiarowy temperatury (1). Natężenie przepływu wody mierzone było za pomocą rotametru laboratoryjnego, natomiast częstotliwość drgań ustalano na elek-

tronicznym generatorze typu MAXCOM-Mx-2020. Wzmocniony impuls przekształcony był w elektrodynamicznym symulatorze drgań na impuls mechaniczny. Symulator drgań jest konstrukcji autora. Symulator ten posiada możliwość regulacji wielkości amplitudy drgań. Charakterystykę drgań tego typu symulatora przeanalizowano w pracy [11]. We wszystkich przypadkach amplitudę drgań ( $A$ ) określano jako odległość między skrajnym położeniem rury doświadczalnej. W czasie pomiarów woda krążyła w układzie zamkniętym. Rzeczywisty wygląd stanowiska badanego pokazano na fotografii rys. 2.2.



Rys. 2.2. Stanowisko badawcze  
Fig. 2.2. Experimental research stand



Rys. 2.3. Rura pomiarowa z termoparami  
Fig. 2.3. The test pipe with thermocouples

W czasie każdego doświadczenia mierzono:

a - temperaturę na wlocie wody do rury pomiarowej

$t_{T1}$ ,

b - temperaturę wyjścia wody z rury

$t_{T8}$ ,

c - średnią temperaturę ścianki rury (6 punktów pomiarowych)

$t_{śc}$ ,

d - natężenie przepływu wody

V.

W czasie pomiaru utrzymywano na stałym poziomie:

- a - amplitudę drgań,
- b - częstotliwość drgań,
- c - prędkość powietrza w tunelu aerodynamicznym,
- d - temperaturę powietrza w tunelu aerodynamicznym,
- e - temperaturę wody w termostacie.

Na fotografii rys. 2.3. pokazano rurę pomiarową z termoelementami.

Temperaturę w punktach 1÷8 (rys. 2.1) mierzono termoelementami typu (K) - NiCr-NiAl.

### 3. Tunel aerodynamiczny

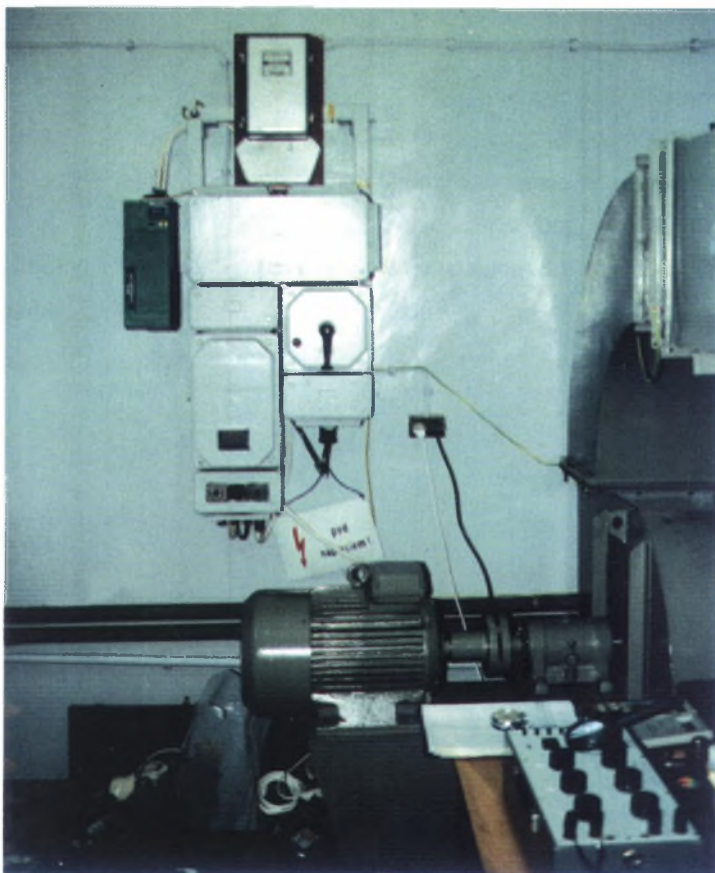
Tunel aerodynamiczny, na którego końcu umieszczona była rura doświadczalna, składał się z następujących elementów:

- a - falownika do ciągłej regulacji obrotów silnika wentylatora,
- b - wentylatora promieniowego z silnikiem,
- c - głównego przewodu powietrza,
- d - końcówki zwiększającej prędkość powietrza,
- e - siatki stabilizującej umieszczonej w przewodzie głównym,
- f - otworów pomiarowych dla pomiaru prędkości i temperatury powietrza.

Na fotografii - rys. 2.4 - widać falownik, wentylator i początek przewodu głównego. Na fotografii rys. 2.2 - widać końcówkę tunelu.

Do ciągłej regulacji obrotów silnika wentylatora zastosowano przemiennik częstotliwości (falownik) typu CDE 1100S-STD, 11 [kW], 380 [V]. Wentylator promieniowy miał charakterystykę:

wydajność -	1500 [m <sup>3</sup> /h],
spręż całkowity -	2600 [Pa],
moc silnika -	11,0 [kW],
obroty silnika -	2900 [1/min].



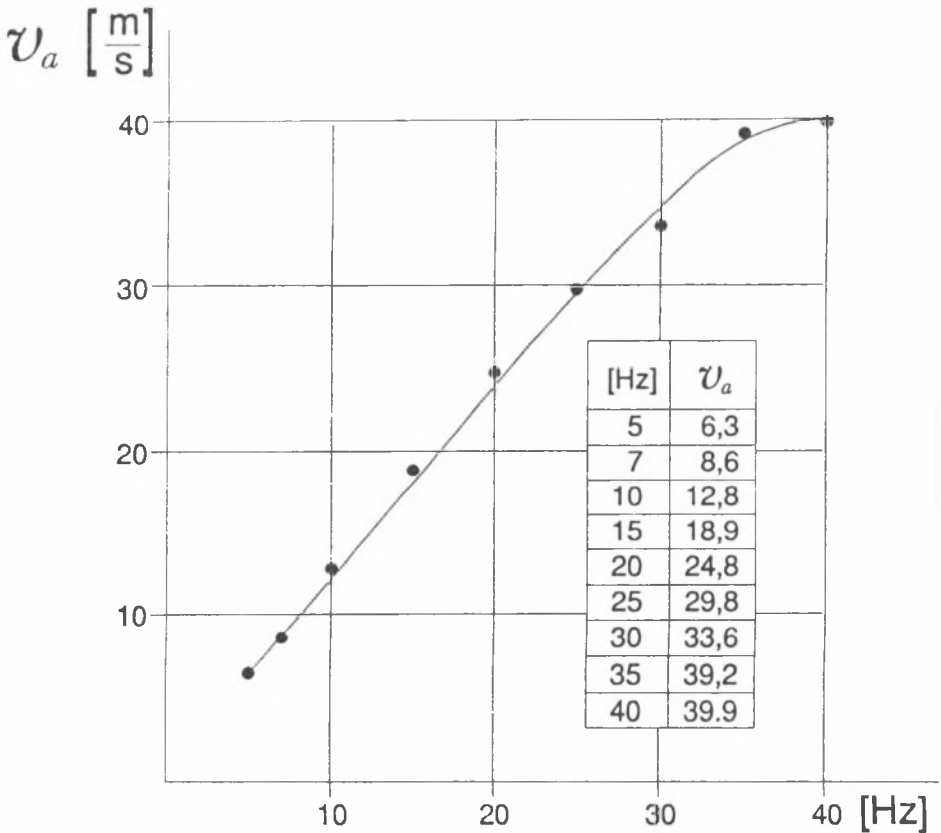
Rys. 2.4. Tunel aerodynamiczny  
Fig. 2.4. Wind-tunnel

Silnik połączony był bezpośrednio z wirnikiem wentylatora. Przewód główny wykonany był z blachy ocynkowanej. W przewodzie tym umieszczono siatkę stalową o oczkach 15 x 15 [mm], w celu wyrównania strugi. Przekrój przewodu głównego był kwadratowy o boku 40 [cm]. Końcówkę tunelu o wymiarach 15,7/20,4 [cm] wykonano z blachy nierdzewnej.

Stosunek powierzchni przekroju przewodu głównego do powierzchni przekroju na wylocie z tunelu wynosił 5,51. Określając ten stosunek uwzględniono powierzchnię zajmowaną przez rurę doświadczalną i przewody termopar.

Charakterystykę aerodynamiczną tunelu wykonano za pomocą anemometru skrzydełkowego typu AS.

W zakresie prędkości powietrza w tunelu 6,3+18,9 [m/s] pole prędkości mierzono w przekroju końcowym. Prędkości większe mierzono w przekroju przewodu głównego tunelu ze względu na zakres pomiarowy przyrządu. Aby określić średnią prędkości powietrza, mierzono prędkość w 4+9 punktach przekroju. Otrzymane wyniki pokazano na rys. 2.5.



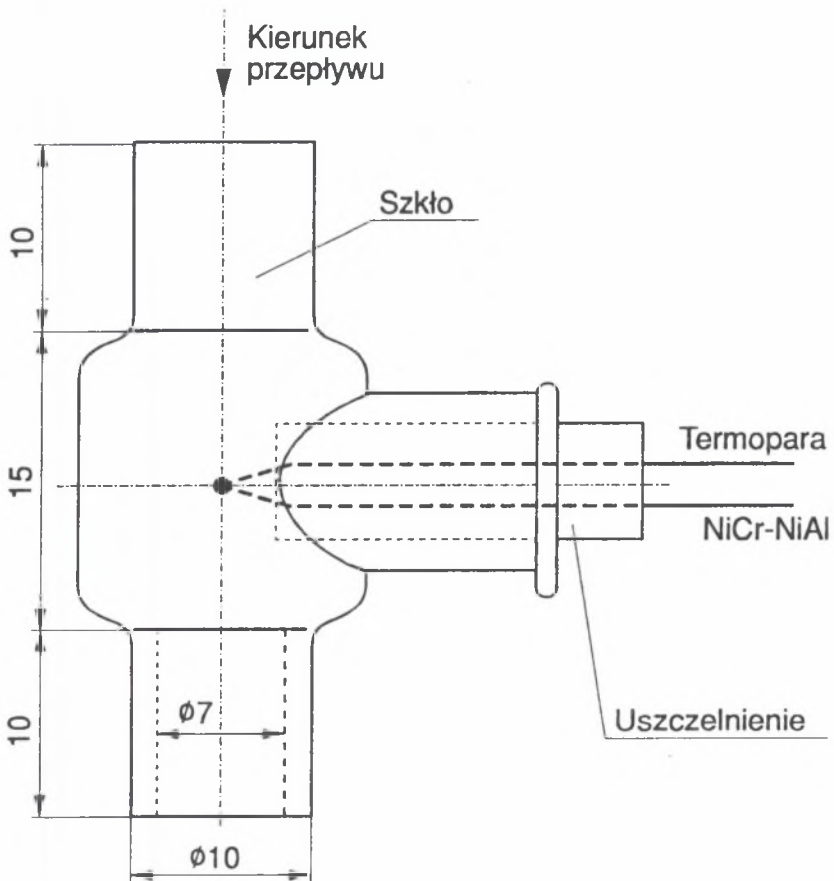
Rys. 2.5. Charakterystyka tunelu aerodynamicznego  
Fig. 2.5. Characteristic of the wind-tunnel



Charakterystykę tunelu podano w funkcji  $v_a = f$  (Hz), gdzie ( $v_a$ ) jest prędkością powietrza na wylocie z tunelu, a częstotliwość  $f$  (Hz) jest częstotliwością ustawioną na falowniku.

Po przeprowadzonych próbach zdecydowano, że prędkość powietrza na wylocie z tunelu 29,8 [m/s] jest optymalna, ponieważ powyżej tej prędkości pole prędkości na wylocie z tunelu nie było dość jednorodne i stabilne. Wszystkie więc pomiary wykonano przy tej prędkości powietrza. Prędkość ta odpowiada częstotliwości 25 [Hz], czyli około 1450 [obr/min] wirnika wentylatora.

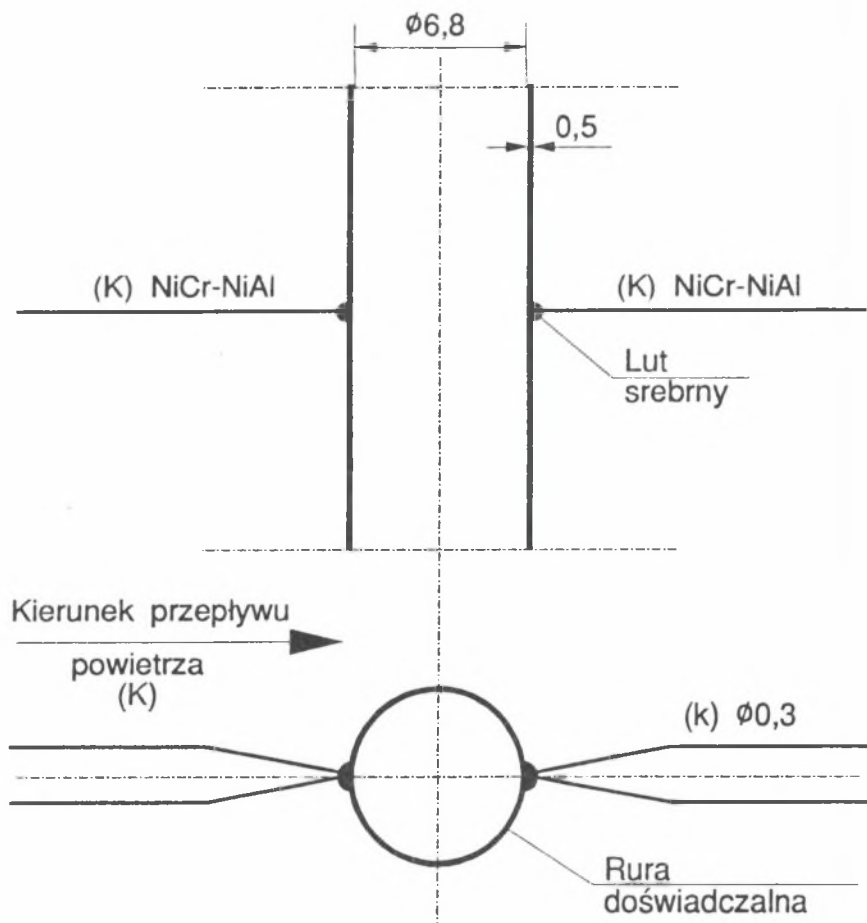
#### 4. Pomiar temperatury



Rys. 2.6. Sposób umieszczania termopar 1 i 8 do pomiaru temperatury przepływającej cieczy  
Fig. 2.6. Location of thermocouples 1 and 8 for temperature measurement of flowing liquid

Temperaturę przepływającej cieczy oraz ścianki rury doświadczalnej mierzono za pomocą termoelementów typu (K) NiCr - NiAl o grubości 0,3 [mm]. W celu określenia temperatury przepływającej cieczy, termopary 1 i 8 (rys. 2.1) umieszczone były w szklanej rurce o zwiększonym przekroju, jak pokazano na rys. 2.6.

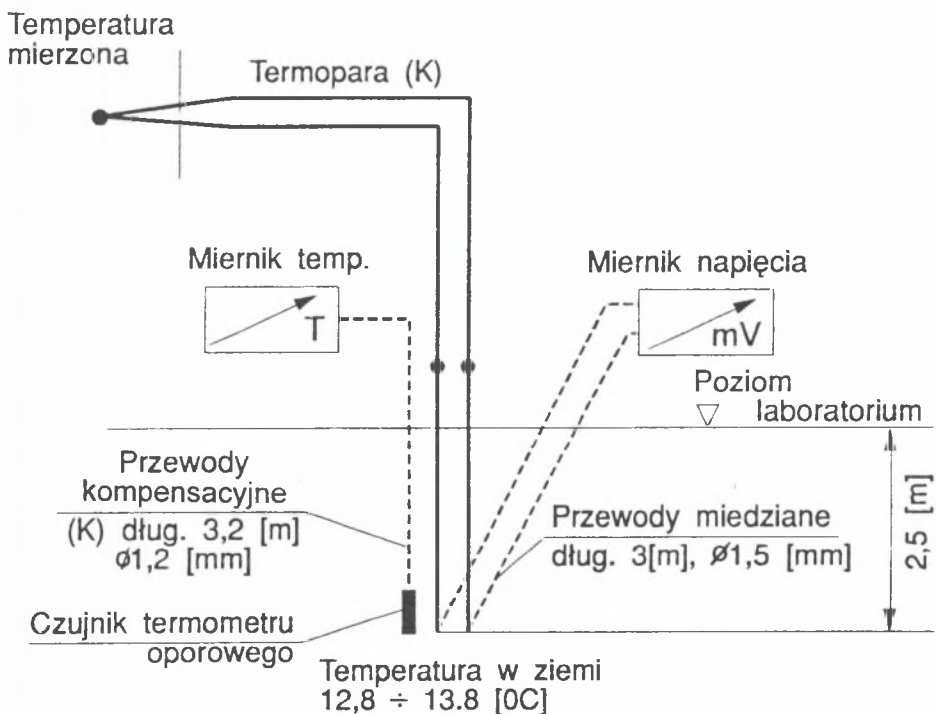
Do określenia temperatury ścianki rury doświadczalnej użyto sześciu termopar przylutowanych do rury lutem srebrnym. Na rysunku 2.7. pokazano rozmieszczenie termopar.



Rys. 2.7. Schemat zamocowania termopar na ściance rury doświadczalnej  
 Fig. 2.7. Fastening of thermocouples on the wall of the test pipe

Wszystkie termopary miały długość 2,0 [m]. Termopary wykonał i dostarczył Zakład Mechaniki Precyzyjnej "ALF" - Kraków.

Każda z ośmiu termopar miała przewody kompensacyjne długości 3,2 [m] wykonane z tego samego materiału, co termopary. Grubość przewodów kompensacyjnych wynosiła 1,2 [mm]. Przewody kompensacyjne połączone były z miernikiem przewodami miedzianymi o średnicy 1,5 [mm]. Końcówki przewodów kompensacyjnych umieszczono w ziemi na głębokości 2,5 [m] w celu uzyskania stałej temperatury "zimnego końca" termopar. Temperatura "zimnego końca" mierzona była w sposób ciągły, ponieważ na głębokości 2,5 [m] umieszczono czujnik termometru oporowego. Temperatura "zimnego końca" w czasie pomiarów w okresie styczeń - marzec 1997 wynosiła  $12,8 \div 13,8$  [°C]. Od "zimnego końca" do przyrządu pomiarowego połączenie wykonane było przewodem miedzianym o średnicy 1,5 [mm]. Schemat połączenia każdej z termopar pokazano na rys. 2.8.



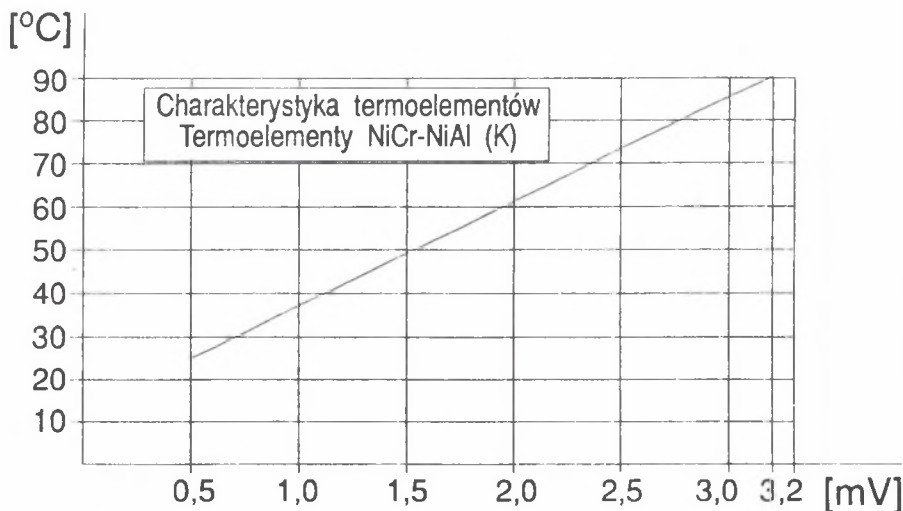
Rys. 2.8. Schemat połączeń termopar  
Fig.2.8. Diagram of the connection of thermocouples

W celu uzyskania średniej temperatury ścianki rury doświadczalnej termopary 2+7 połączono równolegle. W ten sposób uzyskano za pomocą jednego odczytu wartość średniej temperatury ścianki rury. Do pomiaru napięcia termoelektrycznego użyto multimetru cyfrowego Typ V-543 pozwalającego odczytać napięcie z dokładnością do 0.01 [mV]. Ponadto instalacja termopar miała gniazda kontrolne do okresowej kontroli dokładności wskazań multimetru. Okresowe kontrole wskazań multimetru oraz cechowanie termopar wykonano za pomocą kompensatora laboratoryjnego KT-35 klasy 0,1 pozwalającego odczytać napięcie z dokładnością do 0,001 [mV].

Do cechowania termopar użyto ultratermostatu z rtęciowym termometrem laboratoryjnym. Wszystkie termopary wycechowano w ośmiu temperaturach zawartych w przedziale  $25 \div 90$  [°C]. Dla każdej temperatury pomiary wykonano trzykrotnie. Cechowanie termopar wykonano w warunkach:

temperatura w pomieszczeniu -	20 [°C],
wilgotność powietrza w pomieszczeniu -	65 [%],
ciśnienie atmosferyczne -	980 [hPa],
temperatura "zimnego końca" -	13,8 [°C].

Charakterystyki wszystkich termopar były bardzo zbliżone.



Rys. 2.9. Charakterystyka termoelementów  
Fig. 2.9. Characteristic of thermocouples

Na rys. 2.9. pokazano uśrednioną charakterystykę wszystkich ośmiu termopar użytych w doświadczeniach.

Ze względu na konstrukcję stanowiska badawczego pomiar temperatury na wlocie i wylocie wody z rury pomiarowej mierzono termoparami 1 i 8. Pomiar taki jest obarczony błędem wynikającym z odległości termopar od wlotu i wylotu wody. Lokalizację termopar pokazano na rys. 2.10.

Aby określić spadek temperatury na odcinkach dopływowym i odpływowym, zaizolowano rurę pomiarową i mierzono spadek temperatury ( $\Delta t_c$ ) na odcinku od termopary 1 do termopary 8. Mając spadek temperatury na całym odcinku, wyliczono spadek temperatury na 1 [cm] długości przewodu.

Mnożąc jednostkowy spadek temperatury przez długość dopływu wody, określono spadek temperatury na dopływie. Wartość tę odejmowano od wskazań termopary 1. Wartość spadku termopary na odpływie dodawano do wskazań termopary 8. W ten sposób określono temperatury ( $t_1$ ) i ( $t_2$ ).

$$t_1 = t_{T1} - \Delta t_N \quad (1)$$

$$t_2 = t_{T8} + \Delta t_W \quad (2)$$

$$\Delta t_c = \Delta t_N + \Delta t_W + \Delta t_R \quad (3)$$

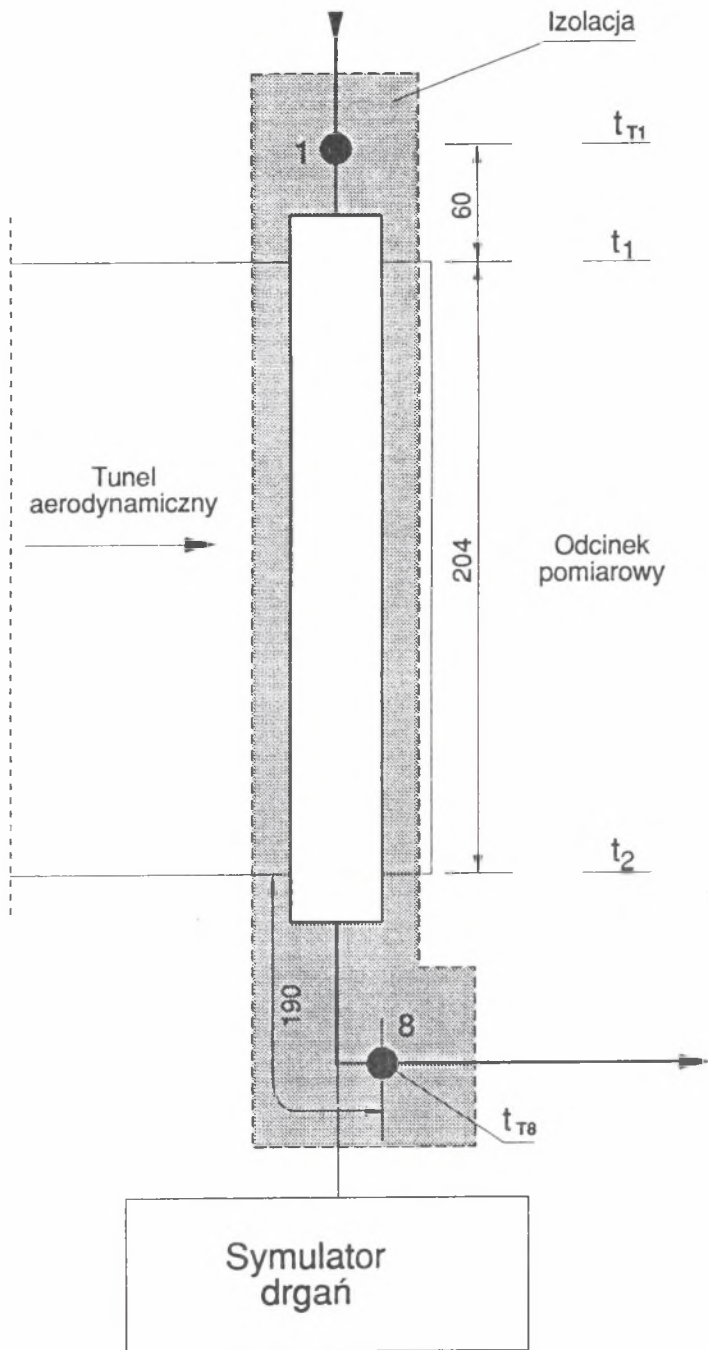
Spadek temperatury między termoparami 1 i 8 mierzono po zaizolowaniu całego odcinka. Pomiaru te wykonano utrzymując temperaturę wody zbliżoną do temperatur uzyskiwanych w doświadczeniach.

Spadek temperatury wody w funkcji natężenia przepływu pokazano na rys. 2.11.

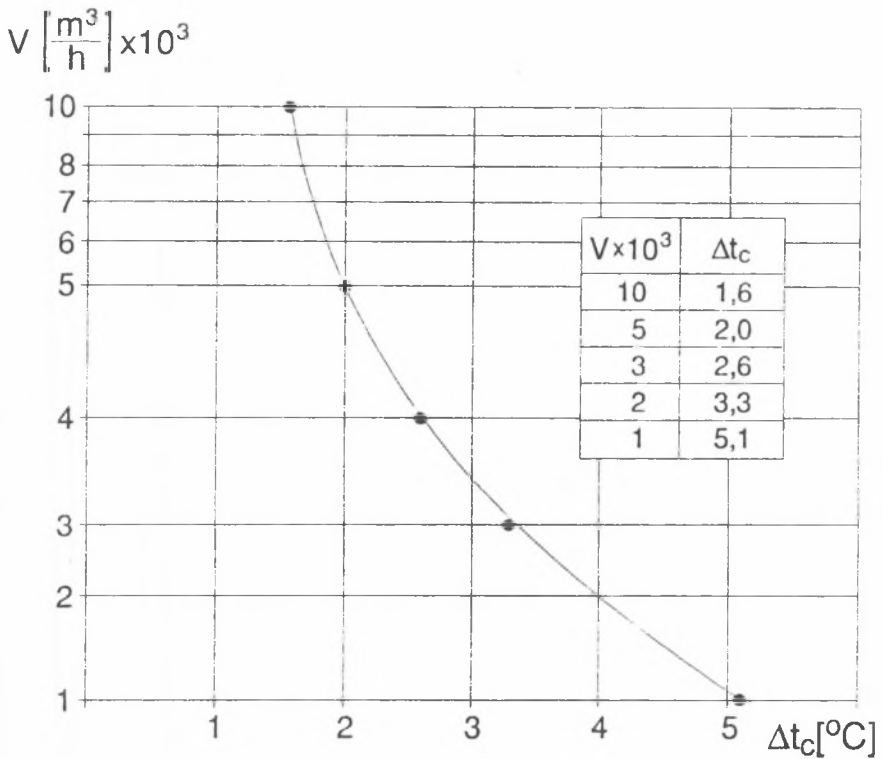
Znając wartość ( $\Delta t_c$ ) obliczono:

$$\Delta t_N = \frac{\Delta t_c}{45,4} \cdot 6,0 = 0,132 \Delta t_c \text{ [K]} \quad (4)$$

$$\Delta t_W = \frac{\Delta t_c}{45,4} \cdot 19,0 = 0,419 \Delta t_c \text{ [K]} \quad (5)$$



Rys. 2.10. Rozkład temperatur między termoparą 1 i 8  
 Fig. 2.10. Distribution of temperatures between thermocouples 1 and 8



Rys. 2.11. Spadek temperatury między termoparami 1 i 8  
 Fig. 2.11. Temperature drop between thermocouples 1 and 8

Na tej podstawie wykonano tablicę poprawek zaokrąglając wyniki do 0,1 [K].

Do obliczeń przyjęto temperaturę wewnętrzną ścianki rury doświadczalnej równą temperaturze zewnętrznej, którą zmierzono. W ten sposób popełniono błąd wielkości:

$$\Delta t = \frac{Q_s}{\lambda F} = 0,02 \text{ [K]}$$

W równaniu tym:

$Q = 200$  [kJ/h] - 56 [W] (maksymalna wymiana ciepła),

$s = 0,0005$  [m] - grubość ścianki rury,

$\lambda = 372$  [W/mK] - dla miedzi,

$F = 43,34 \cdot 10^{-4}$  [m<sup>2</sup>] - powierzchnia rury.

Wielkość błędu leży w granicy błędu odczytu temperatury.

Tablica 1

Poprawki

Przepływ $V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	$\Delta t_N$ [°C]	$\Delta t_w$ [°C]
1.0	0.7	2.1
1.2	0.6	1.9
1.6	0.5	1.6
1.8	0.5	1.4
2.0	0.4	1.4
2.5	0.4	1.2
2.6	0.4	1.2
2.8	0.4	1.2
3.0	0.3	1.1
3.5	0.3	1.0
4.0	0.3	0.9
4.5	0.3	0.8
5.0	0.3	0.8
5.5	0.3	0.8
6.0	0.2	0.8
6.5	0.2	0.8
7.0	0.2	0.8
8.0	0.2	0.7
9.0	0.2	0.7
10.0	0.2	0.7

## 5. Pomiar przepływu

Przepływ mierzono rotametrem laboratoryjnym. Rotametr wyskalowany był dla wody o temperaturze 15 [°C] i przepływu w [l/h]. Średnia temperatura wody w czasie doświadczeń wynosiła 75 [°C].

Natężenie przepływu odczytywano ze skali rotametru nie uwzględniając poprawki na temperaturę wody. Wielkość popełnionego błędu:



$$E = \sqrt{\frac{7900 - \rho_{15}}{7900 - \rho_{75}} \cdot \frac{\rho_{75}}{\rho_{15}}} = 1,01 \quad (6)$$

gdzie:

$\rho_{15} = 999 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  - gęstość wody w 15 [°C],

$\rho_{75} = 975 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  - gęstość wody w 75 [°C].

Błąd wielkości 1% leży w granicach błędu odczytu.

## 6. Założenia przyjęte do obliczeń

Wielkości potrzebne do określenia bezwymiarowych liczb podobieństwa obliczono uwzględniając poprawki na spadek temperatury przy dopływie i odpływie wody z rury doświadczalnej. Wszystkie własności fizyczne wody wyznaczono dla jej średniej temperatury:

$$t_{sr} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (7)$$

Moc cieplną wymiennika określono z równania:

$$Q = V \cdot \rho_{sr} \cdot c_{sr} (t_1 - t_2) \text{ [kJ/h]} \quad (8)$$

Współczynnik przejmowania ciepła przez wewnętrzną powierzchnię rury wyliczono:

$$\alpha = \frac{0,2775 Q}{F(t_{sr} - t_{sc})} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (9)$$

gdzie:

0,2775 jest współczynnikiem wynikającym z zamiany  $\left[ \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right]$  na [W].

Powierzchnię wymiany ciepła (F) obliczono odejmując powierzchnię lutów termopar od powierzchni ścianki rury. Pozostałe wielkości określono na podstawie wartości zmierzonych lub wyliczonych.

## 7. Ocena błędów pomiarów

Wielkość błędu przy pomiarze (Q) określono analizując parametry zmierzone. Pomiar temperatur ( $t_1$ ) i ( $t_2$ ) został obciążony błędem przy odczycie jak również przy określeniu poprawki na dopływie i odpływie. Temperaturę określano z dokładnością do 0,1 [K]. Zakładając, że taki błąd popełniono każdorazowo przy pomiarze i określeniu poprawek, całkowity błąd maksymalny przy określeniu ( $t_1 - t_2$ ) wynosi 0,4 [K]. Błąd maksymalny nastąpi przy maksymalnych przepływach gdzie, ( $\Delta t$ ) jest najmniejsze i wynosi 4,5 [K].

Maksymalny błąd względny przy określeniu ( $t_1 - t_2$ ):

$$100 \cdot \frac{\Delta(t_1 - t_2)}{t_1 - t_2} = \frac{0,4}{4,5} \cdot 100 = 9,0 \text{ (\%)} \quad (10)$$

Maksymalny błąd względny przy określeniu (V):

- błąd odczytu przy przepływie 10 [l/h] może wynieść 0,1 [l/h],

błąd z różnicy gęstości 1%

$$100 \cdot \frac{0,1}{10} + 1 = 2 \text{ (\%)} \quad (11)$$

Zgodnie z prawem dodawania niezależnych błędów losowych [29]

$$E_Q = \sqrt{9^2 + 2^2} = 9,2 \text{ (\%)} \quad (12)$$

W miarę wzrostu ( $t_1 - t_2$ ) błąd całkowity będzie malał. Błąd przy określeniu współczynnika przyjmowania ciepła określono analizując błąd przy pomiarze ( $t_{\text{śc}}$ ) i ( $t_{\text{sr}}$ ).

Temperaturę ścianki mierzono sześcioma termoparami. Każdy pomiar był obarczony błędem 0,2 [K] licząc błąd odczytu i spadek temperatury na grubości ścianki. Przy temperaturze ścianki 65 [°C] błąd całkowity wyniesie:

$$\sqrt{\left(\frac{0,2}{65} \cdot 100\right)^2} \cdot 6 = 0,8 [\%] \quad (12)$$

Przy określeniu ( $t_{sr}$ ) błąd można przyjąć jak dla ( $t_1 - t_2$ ) w wysokości 0,4 [K]. Dla wartości 84 [°C] błąd wyniesie:

$$100 \cdot \frac{0,4}{84} = 0,5 [\%] \quad (13)$$

Błąd całkowity przy pomiarze ( $\alpha$ ):

$$E_\alpha = \sqrt{9,2^2 + 0,8^2 + 0,5^2} = 9,2 [\%]$$

Z powyższej analizy wynika, że największym błędem jest obciążony pomiar ( $Q$ ) przy największym natężeniu przepływu. W warunkach tych występuje najmniejsza wartość ( $t_1 - t_2$ ).

## 8. Pomiary wymiany ciepła w rurze doświadczalnej w spoczynku (bez drgań)

Aby uzyskać możliwość porównania intensywności wymiany ciepła w rurze poddanej drganiom, wykonano 46 pomiarów rury w spoczynku (bez drgań). Badania przeprowadzono w zakresie:

$$8 \leq Gz \leq 80$$

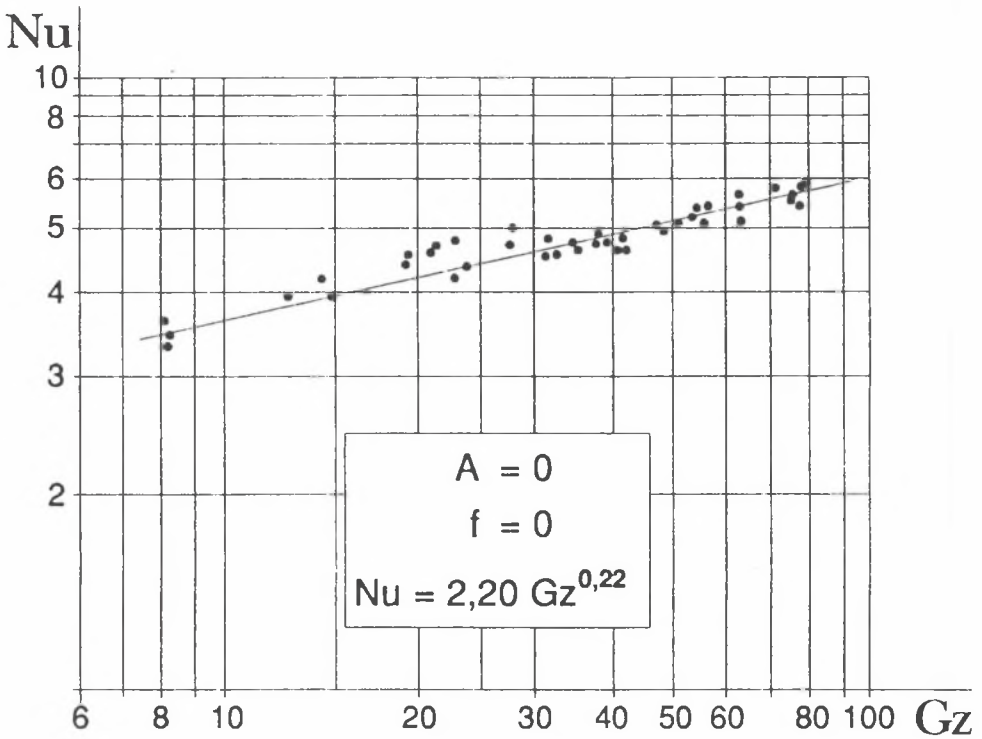
$$110 \leq Re \leq 1500$$

$$2,06 \leq Pr \leq 2,68$$

Prędkość przepływu wody w rurze doświadczalnej wynosiła:

$$0,0076 \leq v \leq 0,076 \text{ [m/s]}$$

Wyniki pomiarów zebrano w tablicy 2 i pokazano na rys. 2.12.



Rys. 2.12. Rozrzut punktów pomiarowych, rura doświadczalna w spoczynku

Fig. 2.12. Dispersion of measuring points, test pipe without vibrations

Data pomiarów: luty 1997  
 Prędkość powietrza w tunelu: 29,8 [m/s]  
 Temperatura powietrza w tunelu: 21+23°C

Tablica 2

**A=0 f=0**

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>2</sub> [°C]	t <sub>ścianki</sub> [°C]	Q [kJ/h]	Re	α [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz
1	1.0	0.0076	79.9	53.3	48.5	108	117	357	3.6	2.68	8.2
2	1.0	0.0076	79.6	54.5	48.5	102	117	328	3.3	2.66	8.2
3	1.0	0.0076	79.6	53.2	48.7	107	117	345	3.5	2.70	8.3
4	1.6	0.0122	82.0	62.5	52.8	127	207	390	4.0	2.38	12.9
5	1.8	0.0138	82.5	64.2	53.8	134	235	409	4.2	2.33	14.3
6	2.0	0.0115	82.8	65.8	53.8	138	262	403	4.1	2.25	15.4
7	2.5	0.0190	86.0	71.0	57.5	152	346	433	4.4	2.16	19.6
8	2.6	0.0198	86.6	73.2	61.3	142	368	457	4.6	2.13	19.7
9	2.7	0.0210	86.8	73.7	61.7	144	393	464	4.7	2.13	21.9
10	2.8	0.0210	86.1	72.0	57.9	161	386	454	4.6	2.14	21.6
11	2.9	0.0222	86.3	74.1	62.1	144	416	476	4.8	2.13	23.2
12	3.0	0.0230	84.1	71.4	56.5	154	423	434	4.4	2.17	24.0
13	3.5	0.0270	84.4	72.1	57.5	175	496	504	5.1	2.16	28.1
14	4.0	0.0310	82.3	72.1	56.0	165	555	466	4.7	2.16	31.4
15	4.0	0.0310	84.9	74.4	57.3	170	570	454	4.6	2.14	32.2
16	4.0	0.0310	86.1	75.9	59.2	166	586	456	4.6	2.11	32.4
17	3.0	0.0230	81.5	69.4	54.8	147	401	425	4.3	2.21	23.2
18	4.0	0.0310	84.4	73.5	56.6	177	570	473	4.8	2.14	32.0
19	4.5	0.0340	84.7	74.9	57.0	179	625	470	4.8	2.14	35.0
20	4.5	0.0340	86.1	76.8	59.5	171	646	465	4.7	2.10	35.5
21	5.0	0.0380	82.7	74.2	57.0	172	687	479	4.9	2.15	38.7
22	5.0	0.0380	85.4	76.5	57.9	180	718	477	4.8	2.12	40.0
23	5.0	0.0380	85.4	76.6	58.4	178	718	472	4.8	2.12	39.9
24	5.0	0.0380	85.0	75.9	57.2	184	698	473	4.8	2.12	38.4
25	5.5	0.0420	85.2	76.7	57.6	190	793	486	4.9	2.11	43.8
26	5.5	0.0420	86.1	78.4	59.9	173	816	462	4.7	2.08	44.5
27	5.5	0.0420	85.6	77.7	59.2	176	793	468	4.7	2.10	43.6
28	6.0	0.0460	85.5	77.2	58.0	202	869	517	5.2	2.10	47.8
29	6.0	0.0460	86.2	78.7	60.1	183	894	489	5.0	2.08	48.7
30	7.0	0.0540	85.9	78.9	60.2	199	1049	537	5.5	2.08	57.2
31	7.0	0.0540	85.7	78.4	58.7	207	1020	530	5.4	2.09	55.8
32	7.0	0.0540	86.3	79.7	60.9	188	1049	509	5.2	2.07	56.9
33	7.0	0.0540	83.8	76.8	58.4	199	1114	544	5.5	2.12	56.3
34	8.0	0.0610	85.7	79.6	61.1	198	1185	549	5.6	2.08	64.6
35	8.0	0.0610	84.0	77.6	58.9	208	1152	569	5.8	2.11	63.7
36	8.0	0.0610	86.4	80.3	61.3	199	1202	539	5.5	2.06	64.9
37	8.0	0.0610	85.9	79.3	59.5	214	1152	555	5.6	2.08	62.8
38	9.0	0.0690	86.0	79.9	59.7	223	1341	573	5.9	2.06	72.4
39	6.5	0.0500	85.7	78.0	58.4	203	944	517	5.2	2.09	51.7
40	10.0	0.0760	86.2	80.8	60.2	219	1477	563	5.8	2.05	79.3
41	10.0	0.0760	84.0	78.8	60.0	211	1456	590	6.0	2.10	80.1
42	10.0	0.0760	86.2	81.3	62.3	199	1477	554	5.6	2.06	79.7
43	10.0	0.0760	86.0	81.1	62.3	199	1477	559	5.7	2.06	79.7
44	8.0	0.0610	86.2	80.4	61.3	188	1185	512	5.2	2.06	64.0
45	10.0	0.0760	86.0	81.1	62.6	199	1477	567	5.8	2.06	79.7

Zależność  $Nu = f(Gz)$  jest w układzie podwójnie logarytmicznym zbliżona do prostej o kącie nachylenia względem osi ( $Gz$ ) wynoszącym  $12,5^\circ$ . Równanie tej prostej ma postać:

$$Nu = 2,20 Gz^{0,22} \quad (14)$$

Liczba ( $Gz$ ) jest uważana za liczbę charakterystyczną dla ruchu ciepła w przepływie laminarnym. Rozrzut punktów pomiarowych (rys. 2.12) wynosi  $\max + 9 [\%]$  i  $- 6 [\%]$ .

## 9. Pomiary wymiany ciepła w rurze doświadczalnej poddanej drganiom

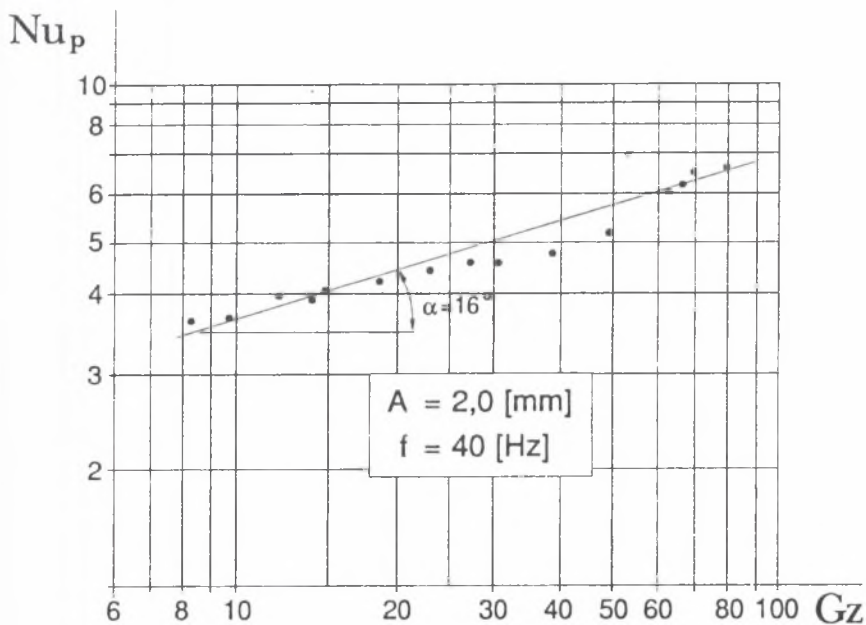
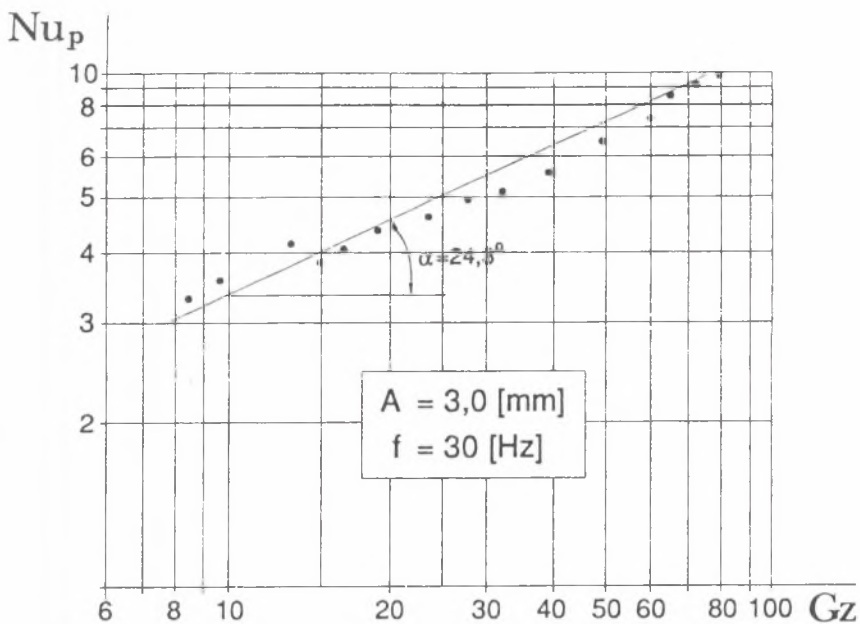
Pomiary wymiany ciepła wykonano poddając rurę doświadczalną drganiom o zmiennej częstotliwości i amplitudzie. Kierunek drgań był zgodny z kierunkiem przepływu cieczy. Wyniki pomiarów ujęto w tablicach 3 ÷ 9 oraz pokazano na rys. 2.13 ÷ 2.16.

Jak wynika z analizy wymiarowej [11], równanie korelacyjne powinno mieć postać:

$$Nu_p = C Gz^m Ka^c \left( \frac{d}{A} \right)^d \quad (15)$$

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że w zbadanym zakresie teoria podobieństwa nie daje zadowalających wyników. Kąt pochylenia prostych  $Nu = f(Gz)$  w układzie podwójnie logarytmicznym był różny i zależny od amplitudy ( $A$ ). Biorąc pod uwagę powyższy fakt, równanie korekcyjne powinno mieć postać:

$$Nu_p = C Gz^a \left( \frac{A}{d} \right)^b Ka^c \left( \frac{d}{A} \right)^d \quad (16)$$



Rys. 2.13. Punkty pomiarowe, rura doświadczalna poddana drganiom  
 Fig. 2.13. Measuring points, test pipe exposed to vibrations

Data pomiarów: luty 1997

Prędkość powietrza w tunelu; 29,8 [m/s]

Temperatura powietrza w tunelu: 21°C

Tablica 3

$A=3.0[\text{mm}]; f=30[\text{Hz}]; d/A=2.27$

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>2</sub> [°C]	t <sub>ścianki</sub> [°C]	Q [kJ/h]	Re	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz	Ka	$\beta$	Nu <sub>p</sub> /Nu
1	10.00	0.0760	86.3	80.8	69.9	223	1477	978	9.9	2.06	79.7	3963	160.1	1.42
2	9.00	0.0690	86.2	80.0	68.6	226	1341	933	9.5	2.07	72.7	3963	145.6	1.39
3	8.00	0.0610	86.2	79.4	67.0	221	1185	838	8.5	2.08	64.6	3963	105.9	-
4	7.00	0.0570	86.1	78.9	65.7	204	1107	727	7.4	2.09	60.6	3963	100.1	1.35
5	6.00	0.0460	85.5	77.6	63.6	192	894	639	6.5	2.11	49.4	3963	81.6	-
6	5.00	0.0380	85.2	76.5	61.8	176	718	552	5.6	2.12	39.9	3853	65.9	1.25
7	4.00	0.0310	84.9	74.5	59.9	169	586	511	5.2	2.14	32.9	3853	54.4	-
8	3.50	0.0270	84.6	73.3	59.4	160	496	489	5.0	2.15	27.9	3749	46.0	1.18
9	3.00	0.0230	84.1	71.4	58.2	154	423	470	4.8	2.17	24.0	3749	39.6	-
10	2.50	0.0190	82.8	69.2	57.2	138	331	440	4.5	2.20	19.1	3557	31.6	1.10
11	2.00	0.0150	82.1	66.4	55.8	127	262	411	4.2	2.27	15.6	3557	25.8	-
12	1.80	0.0138	80.9	64.7	54.5	118	229	386	3.9	2.37	14.2	3468	23.5	1.05
13	1.60	0.0122	81.4	62.5	53.8	123	202	405	4.1	2.41	12.8	3383	21.1	-
14	1.20	0.0092	80.7	58.4	51.5	109	149	361	3.7	2.55	10.0	3303	16.5	1.00
15	1.00	0.0076	79.4	54.7	49.8	100	120	333	3.4	2.66	8.4	3226	14.0	0.96

Data pomiarów: luty 1997

Prędkość powietrza w tunelu; 29,8 [m/s]

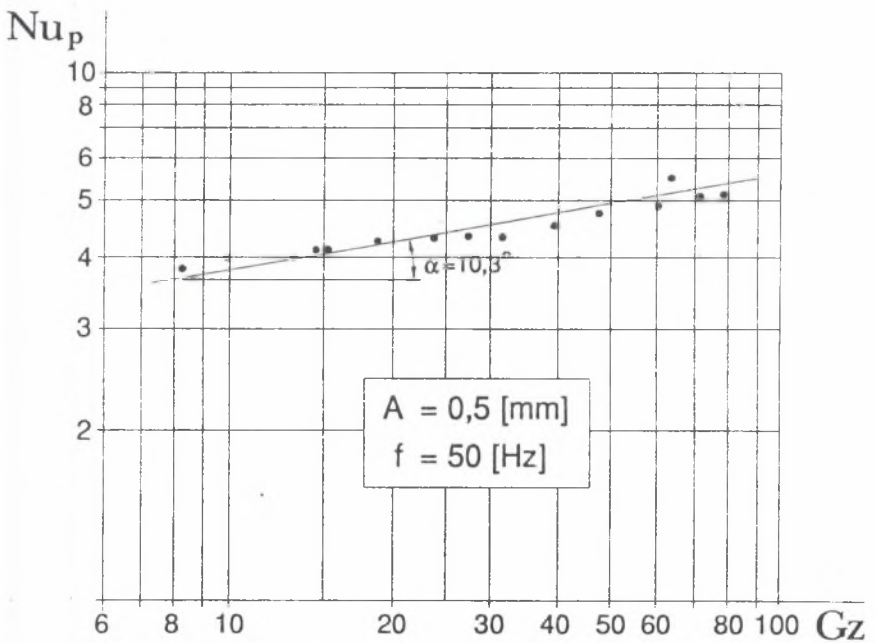
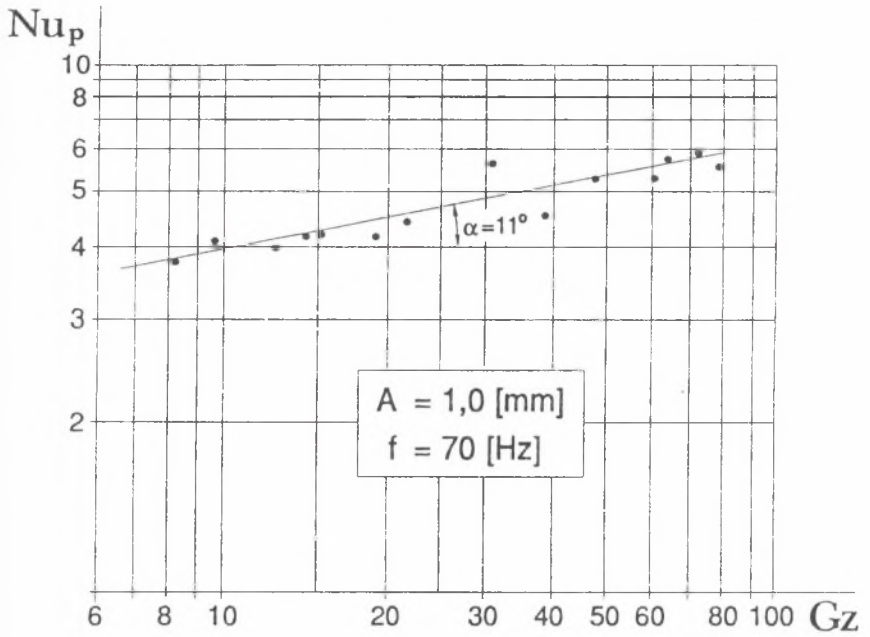
Temperatura powietrza w tunelu: 23°C

Tablica 4

$A=2.0[\text{mm}]; f=40[\text{Hz}]; d/A=3.40$

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>2</sub> [°C]	t <sub>ścianki</sub> [°C]	Q [kJ/h]	Re	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz	Ka	$\beta$	Nu <sub>p</sub> /Nu
1	10.0	0.0760	86.3	81.5	66.5	195	1520	671	6.8	2.07	82.4	5440	131.4	1.21
2	9.0	0.0690	86.2	80.5	64.5	208	1341	659	6.7	2.06	72.4	5285	118.8	-
3	8.0	0.6100	85.9	79.9	63.8	195	1185	611	6.2	2.08	64.6	5285	102.0	1.18
4	7.0	0.0570	85.8	79.0	62.7	193	1107	587	6.0	2.09	60.6	5285	94.6	-
5	6.0	0.0460	85.7	78.7	60.5	170	893	469	4.8	2.10	49.1	5285	65.8	1.14
6	5.0	0.0380	85.6	77.1	59.5	172	718	470	4.8	2.11	39.7	5138	57.1	-
7	4.0	0.0310	85.0	75.0	58.7	162	570	455	4.6	2.13	31.8	4999	47.2	1.09
8	3.5	0.0270	84.6	73.6	58.4	156	496	451	4.6	2.15	27.9	4999	43.2	-
9	3.0	0.0230	84.4	72.0	57.8	151	412	443	4.5	2.17	23.4	4867	37.6	1.05
10	2.5	0.0190	83.6	69.8	56.8	140	331	421	4.3	2.20	19.1	4743	31.6	-
11	2.0	0.0150	83.1	67.1	55.8	130	262	403	4.1	2.22	15.2	4743	25.7	1.00
12	1.8	0.0138	82.4	65.2	54.9	126	235	399	4.0	2.33	14.3	4624	24.1	-
13	1.6	0.0122	82.0	63.4	54.1	121	202	390	4.0	2.37	12.4	4511	21.9	0.98
14	1.2	0.0092	80.8	58.5	52.0	109	149	369	3.7	2.55	10.0	4404	17.5	-
15	1.0	0.0076	79.7	54.9	50.0	101	120	350	3.6	2.64	8.3	4301	15.0	0.94





Rys. 2.14. Punkty pomiarowe, rura doświadczalna poddana drganiom  
 Fig. 2.14. Measuring points, test pipe exposed to vibrations

Data pomiarów: luty 1997

Tablica 5

Prędkość powietrza w tunelu: 29,8 [m/s]

Temperatura powietrza w tunelu: 23°C

$A=1.0[\text{mm}]$ ;  $f=70[\text{Hz}]$ ;  $d/A=6.80$

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>2</sub> [°C]	t <sub>ścianki</sub> [°C]	Q [kJ/h]	Re	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz	Ka	$\beta$	Nu <sub>p</sub> /Nu
1	10.0	0.0760	86.3	81.4	83.9	199	1477	556	5.6	2.04	78.9	9248	122.8	1.03
2	9.0	0.0690	86.0	80.5	83.3	201	1341	568	5.8	2.05	72.0	9248	118.8	-
3	8.0	0.6100	86.0	80.0	83.0	195	1185	564	5.7	2.06	64.0	9248	107.0	1.03
4	7.0	0.0570	86.0	79.4	82.7	187	1107	523	5.3	2.08	60.3	9248	95.2	-
5	6.0	0.0460	85.9	78.2	82.1	187	894	521	5.3	2.10	49.2	9248	81.8	1.03
6	5.0	0.0380	85.2	77.1	81.2	164	718	455	4.6	2.11	39.7	8991	60.5	-
7	4.0	0.0310	85.1	75.0	80.1	164	570	559	5.7	2.13	31.8	8748	63.4	1.00
9	3.0	0.0230	84.6	72.0	78.3	153	423	445	4.5	2.16	23.9	8748	40.5	-
10	2.5	0.0190	83.8	69.8	76.8	142	340	423	4.3	2.20	19.6	8518	33.4	0.99
11	2.0	0.0150	83.2	66.6	74.9	135	262	417	4.2	2.25	15.4	7299	27.2	-
12	1.8	0.0138	82.7	64.7	73.7	131	235	411	4.2	2.32	14.3	8092	25.7	0.98
13	1.6	0.0122	82.1	62.8	72.5	125	207	398	4.0	2.38	12.9	8092	22.7	-
14	1.2	0.0092	81.2	57.0	69.1	118	149	404	4.1	2.57	10.0	7707	19.2	0.97
15	1.0	0.0076	79.9	53.9	66.9	106	117	373	3.8	2.68	8.2	7356	15.3	0.96

Data pomiarów: marzec 1997

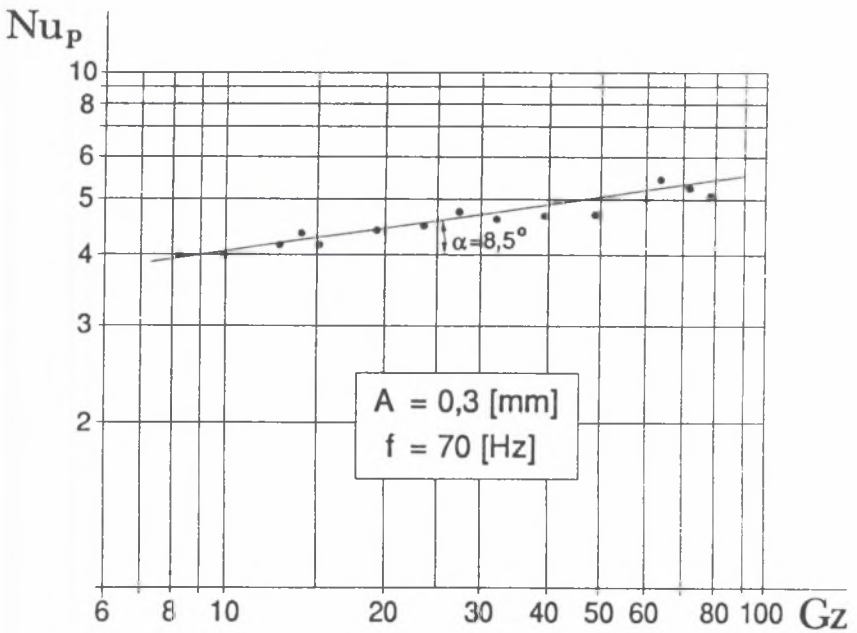
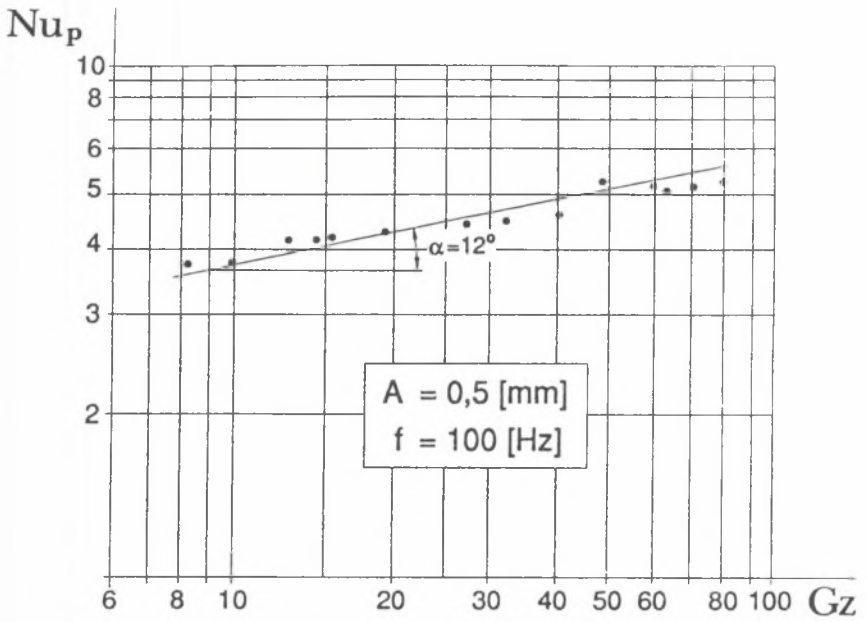
Tablica 6

Prędkość powietrza w tunelu: 29,8 [m/s]

Temperatura powietrza w tunelu: 23°C

$A=0.5[\text{mm}]$ ;  $f=50[\text{Hz}]$ ;  $d/A=13.60$

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>2</sub> [°C]	t <sub>ścianki</sub> [°C]	Q [kJ/h]	Re	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz	Ka	$\beta$	Nu <sub>p</sub> /Nu
1	10.0	0.0760	85.8	81.0	60.5	195	1477	510	5.2	2.07	80.1	6606	120.7	0.99
2	9.0	0.0690	85.8	80.3	59.7	201	1341	514	5.2	2.08	73.1	6606	112.0	-
3	8.0	0.6100	85.9	79.3	59.4	214	1185	552	5.6	2.09	64.9	6606	109.6	0.99
4	7.0	0.0570	85.7	78.9	58.7	193	1107	490	5.0	2.10	60.9	6606	92.9	-
5	6.0	0.0460	85.6	78.0	58.4	185	869	473	4.8	2.11	48.0	6422	73.5	1.00
6	5.0	0.0380	85.1	76.5	57.7	174	718	451	4.6	2.12	39.9	6422	60.7	-
7	4.0	0.0310	84.6	74.4	56.7	165	570	433	4.4	2.14	32.0	6249	48.5	1.02
8	3.5	0.0270	84.1	72.8	56.3	160	496	432	4.4	2.16	28.1	6249	43.6	-
9	3.0	0.0230	84.1	71.1	55.8	158	412	434	4.4	2.21	23.9	6084	38.3	1.03
10	2.5	0.0190	83.1	68.7	55.0	149	331	423	4.3	2.21	19.2	5928	31.3	-
11	2.0	0.0150	82.7	65.5	53.6	139	255	406	4.1	2.27	15.2	5780	24.7	1.04
12	1.8	0.0138	82.2	63.7	52.8	135	235	400	4.1	2.40	14.8	5780	24.2	-
13	1.6	0.0122	81.5	61.3	51.7	131	202	398	4.0	2.49	13.2	5639	21.4	1.05
14	1.2	0.0092	80.2	55.2	49.4	122	145	399	4.0	2.64	10.0	5377	17.1	-
15	1.0	0.0076	79.0	51.5	47.6	112	117	379	3.8	2.74	8.4	5255	14.1	1.06



Rys. 2.15. Punkty pomiarowe, rura doświadczalna poddana drganiom  
 Fig. 2.15. Measuring points, test pipe exposed to vibrations

Data pomiarów: luty 1997

Tablica 7

Prędkość powietrza w tunelu; 29,8 [m/s]

Temperatura powietrza w tunelu: 22°C

$$A=0.5[\text{mm}]; f=100[\text{Hz}]; d/A=13.60$$

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	$v$ [m/s]	$t_1$ [°C]	$t_2$ [°C]	$t_{\text{ścianki}}$ [°C]	$Q$ [kJ/h]	Re	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz	Ka	$\beta$	Nu <sub>p</sub> /Nu
1	10.0	0.0760	86.3	81.8	63.9	178	1520	528	5.4	2.04	81.2	13600	131.4	0.95
2	9.0	0.0690	86.3	81.4	63.3	179	1341	520	5.3	2.04	71.7	13211	116.2	-
3	8.0	0.6100	86.2	80.8	62.6	175	1185	501	5.1	2.06	64.0	13211	102.2	0.96
4	7.0	0.0570	86.0	79.7	61.8	179	1107	508	5.2	2.08	60.3	13211	99.3	-
5	6.0	0.0460	85.9	78.2	60.7	187	894	523	5.3	2.08	48.7	13211	85.1	0.97
6	5.0	0.0380	85.5	77.5	59.9	162	738	449	4.6	2.10	4.1	13211	63.0	-
7	4.0	0.0310	85.1	75.4	59.2	157	586	446	4.5	2.13	32.7	12844	52.3	0.98
8	3.5	0.0270	84.6	74.0	58.7	150	496	436	4.4	2.14	27.8	12497	44.8	-
9	3.0	0.0230	84.1	72.2	58.2	145	423	434	4.4	2.17	24.0	12497	39.8	0.99
10	2.5	0.0190	83.9	70.1	57.2	140	340	423	4.3	2.19	19.5	12168	32.8	-
11	2.0	0.0150	83.4	67.1	56.0	132	262	410	4.2	2.24	15.4	11856	26.5	1.01
12	1.8	0.0138	82.7	65.3	55.1	127	235	402	4.1	2.29	14.1	11560	24.0	-
13	1.6	0.0122	82.2	63.2	54.3	123	207	400	4.1	2.37	12.8	11560	22.2	1.01
14	1.2	0.0092	81.2	58.6	52.4	110	149	376	3.8	2.55	10.0	11278	16.9	-
15	1.0	0.0076	80.3	54.7	50.6	104	120	368	3.7	2.64	8.3	10753	14.1	1.03

Data pomiarów: marzec 1997

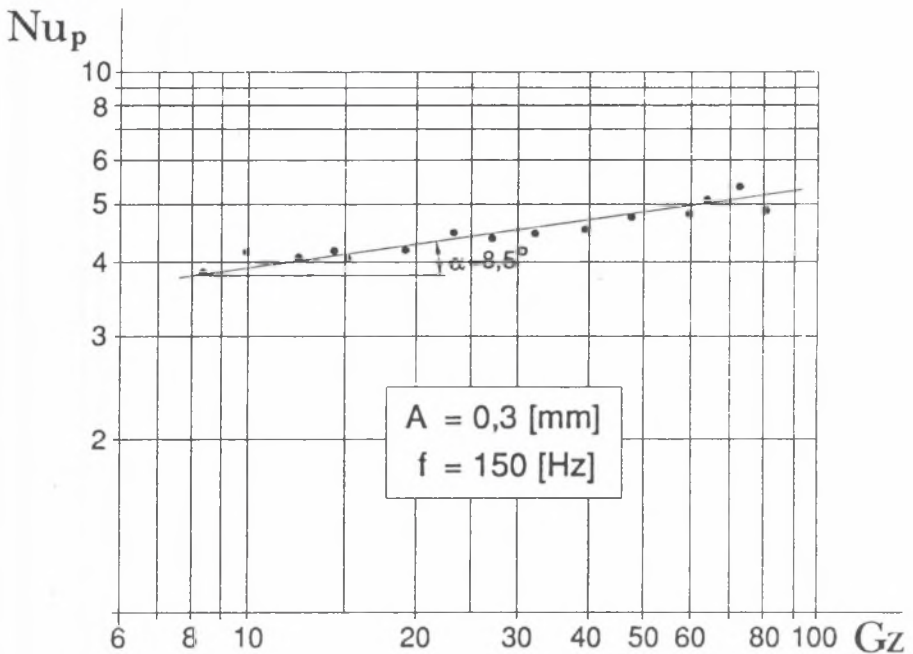
Tablica 8

Prędkość powietrza w tunelu; 29,8 [m/s]

Temperatura powietrza w tunelu: 22°C

$$A=0.3[\text{mm}]; f=70[\text{Hz}]; d/A=22.67$$

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	$v$ [m/s]	$t_1$ [°C]	$t_2$ [°C]	$t_{\text{ścianki}}$ [°C]	$Q$ [kJ/h]	Re	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz	Ka	$\beta$	Nu <sub>p</sub> /Nu
1	10.00	0.0760	86.2	81.7	62.1	182	1477	498	5.1	2.05	79.3	9248	119.1	0.97
2	9.00	0.0690	86.7	81.3	61.3	197	1341	520	5.3	2.05	72.0	9248	114.2	-
3	8.00	0.6100	86.5	80.3	61.1	201	485	540	5.5	2.07	64.3	9248	107.7	0.99
4	7.00	0.0570	86.3	79.7	60.5	187	1107	498	5.1	2.08	60.3	9248	94.5	-
5	6.00	0.0460	86.0	78.7	59.9	178	894	474	4.8	2.09	49.0	9248	74.7	1.00
6	5.00	0.0380	85.7	77.2	59.2	172	718	462	4.7	2.11	39.7	8991	61.1	-
7	4.00	0.0310	85.5	75.2	58.7	167	586	461	4.7	2.13	32.7	8991	51.9	1.03
8	3.50	0.0270	85.4	73.6	58.2	167	496	469	4.8	2.14	27.8	8748	46.2	-
9	3.00	0.0230	85.2	72.2	57.6	158	423	448	4.5	2.16	23.9	8748	38.1	1.06
10	2.50	0.0190	84.5	69.8	56.7	149	340	435	4.4	2.18	19.4	8518	31.2	-
11	2.00	0.0150	83.8	67.1	55.5	135	262	404	4.1	2.21	15.2	8299	23.6	1.09
12	1.80	0.0138	83.5	64.9	54.8	136	235	420	4.3	2.27	14.0	8092	23.1	-
13	1.60	0.0122	83.0	62.9	53.9	130	207	408	4.1	2.35	12.7	8092	20.3	1.10
14	1.20	0.0092	81.9	57.2	51.6	120	149	399	4.0	2.55	10.0	7707	16.1	-
15	1.00	0.0076	81.7	53.7	49.9	113	120	380	3.9	2.64	8.3	7527	13.4	1.14



Rys. 2.16. Punkty pomiarowe, rura doświadczalna poddana drganiom  
 Fig. 2.16. Measuring points, test pipe exposed to vibrations

Data pomiarów: marzec 1997

Tablica 9

Prędkość powietrza w tunelu; 29,8 [m/s]

Temperatura powietrza w tunelu: 23°C

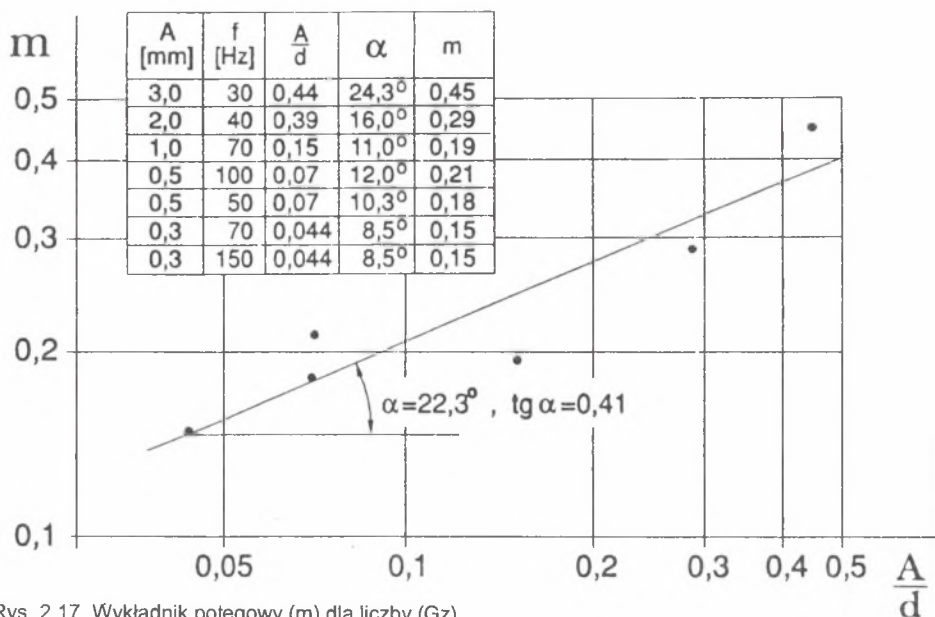
**A=0.3[mm]; f=150[Hz]; d/A=22.67**

L.p.	$V \cdot 10^3$ [m <sup>3</sup> /h]	v [m/s]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>2</sub> [°C]	t <sub>ścianki</sub> [°C]	Q [kJ/h]	Re	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	Nu	Pr	Gz	Ka	$\beta$	Nu <sub>p</sub> /Nu
1	10.0	0.0760	86.2	81.7	61.2	182	1520	478	4.90	2.05	81.6	20400	122.0	0.94
2	9.0	0.0690	86.3	80.8	60.9	200	1341	528	5.40	2.06	73.4	19817	122.7	-
3	8.0	0.0610	86.3	80.4	60.6	191	1185	502	5.10	2.06	64.0	19817	103.4	0.95
4	7.0	0.0570	86.0	79.5	60.1	184	1107	485	4.90	2.08	60.3	19817	94.3	-
5	6.0	0.0460	85.8	78.5	59.4	178	894	467	4.70	2.09	49.0	19817	75.9	0.97
6	5.0	0.0380	85.7	77.2	58.7	172	718	452	4.60	2.10	39.5	19267	61.9	-
7	4.0	0.0310	85.5	75.2	58.0	167	586	446	4.5	2.12	32.5	19287	51.3	1.00
8	3.5	0.0270	85.2	74.0	57.7	159	496	435	4.40	2.14	27.8	18746	43.9	-
9	3.0	0.0230	85.0	72.0	57.1	158	423	442	4.50	2.16	23.9	18746	39.5	1.02
10	2.5	0.0190	84.5	69.9	56.2	148	340	422	4.30	2.18	19.4	18253	31.6	-
11	2.0	0.0150	83.8	66.9	55.0	137	262	402	4.10	2.21	15.2	17785	24.5	1.05
12	1.8	0.0138	83.3	64.7	54.3	136	241	413	4.20	2.30	14.5	17785	24.1	-
13	1.6	0.0122	82.8	62.6	53.3	131	202	404	4.10	2.37	12.5	16917	20.7	1.07
14	1.2	0.0092	82.4	57.2	51.4	123	149	400	4.10	2.55	10.0	16514	17.2	-
15	1.0	0.0076	81.3	53.5	49.4	113	120	376	3.80	2.64	8.3	16130	13.6	1.10

Wykładnik potęgowy dla liczby (Gz) oznaczono:

$$m = c \left( \frac{A}{d} \right)^b \quad (17)$$

Funkcję (17) pokazano na rys. 2.17.



Rys. 2.17. Wykładnik potęgowy (m) dla liczby (Gz)

Fig. 2.17. Exponent (m) for (Gz) number

Na tej podstawie wyznaczono wartość wykładnika potęgowego (b) równą 0,41. Logarytmując równanie (16) otrzymano:

$$\lg C + c \left( \frac{A}{d} \right)^{0,41} \lg Gz + c \lg Ka + d \lg \left( \frac{d}{A} \right) - \lg Nu_p = 0 \quad (18)$$

Równanie (18) posłużyło do ułożenia krakowianu podstawowego [17] składającego się z 104 wierszy (pomiarów). Krakowian podstawowy podniesiony do kwadratu (A) podano w tablicy 10.

Tablica 10

Krakowian (A)

	1	2	3	4	5	suma
1	104.0000	64.6170	405.1940	99.6220	69.9570	743.3900
2	64.6170	47.7254	247.8833	53.2532	45.1307	458.6096
3	405.1940	247.8833	1583.9606	395.0779	272.3084	2904.4242
4	99.6220	53.2532	395.0779	108.9434	66.1479	723.0444
5	69.9570	45.1307	272.3084	66.1479	47.7505	501.2945
suma	743.3900	458.6096	2904.4242	723.0444	501.2945	

Na podstawie krakowianu (A) wyliczono krakowian  $r = \sqrt{A}$ .

Tablica 11

Krakowian  $r = \sqrt{A}$ 

	1	2	3	4	5	suma
1	10.1980	6.3362	39.7327	9.7688	6.8599	72.8956
2	0	2.7528	-1.4062	-3.1400	0.6048	-1.1886
3	0	0	1.8154	1.3890	0.3501	3.5545
4	0	0	0	1.3134	0.4170	1.7304
5	0	0	0	0	0.1733	0.1733

sprawdzenie
72.8956
-1.1886
3.5330
1.7302

Wartości z tablicy 11 pozwalają na wyliczenie niewiadomych w równaniu (18):

$$10,1980 \lg C + a 6,3262 + c 39,7327 + d 9,7688 - 6,8599 = 0 \quad (19)$$

$$a 2,7528 - c 1,4062 - d 3,1400 - 0,6048 = 0 \quad (20)$$

$$c 1,8154 + d 1,3890 - 0,3501 = 0 \quad (21)$$

$$c 1,3134 - 0,4170 = 0 \quad (22)$$

Wyliczone z równań (19-22) niewiadome:

$$a = 0,56$$

$$c = -0,05$$

$$d = 0,32$$

$$C = 1,652$$

Powyższe wielkości uzupełniają równanie korekcyjne (16):

$$Nu_p = 1,652 Gz^{0,56} \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} Ka^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32} \quad (23)$$

Postępując się ostatnim elementem krakowianu pierwiastkowego ( $r_{55}$ ) wyznaczono średni błąd kwadratowy (standardowy) pojedynczego równania [17]:

$$s_o = \frac{r_{55}}{\sqrt{n-x}} = \frac{0,1733}{\sqrt{104-4}} = 0,01733 \quad (24)$$

gdzie (n) jest ilością równań obserwacyjnych (pomiarów), a (x) ilością niewiadomych. Dla tej ilości przeprowadzonych pomiarów współczynnik Studenta dla prawdopodobieństwa 95 [%] [29] wynosi:

$$t_{95;104} = 2,0$$

Wartość przedziału ufności dla równania (23) wynosi:

$$\Delta \lg Nu_p = t \cdot s_o = 2,0 \cdot 0,01733 = 0,03466 \quad (25)$$

$$0,92 \leq \frac{Nu_p}{Nu_p} \leq 1,08$$

Dokładność równania (18) z prawdopodobieństwem 95 [%] wynosi  $\pm 8,0$  [%].

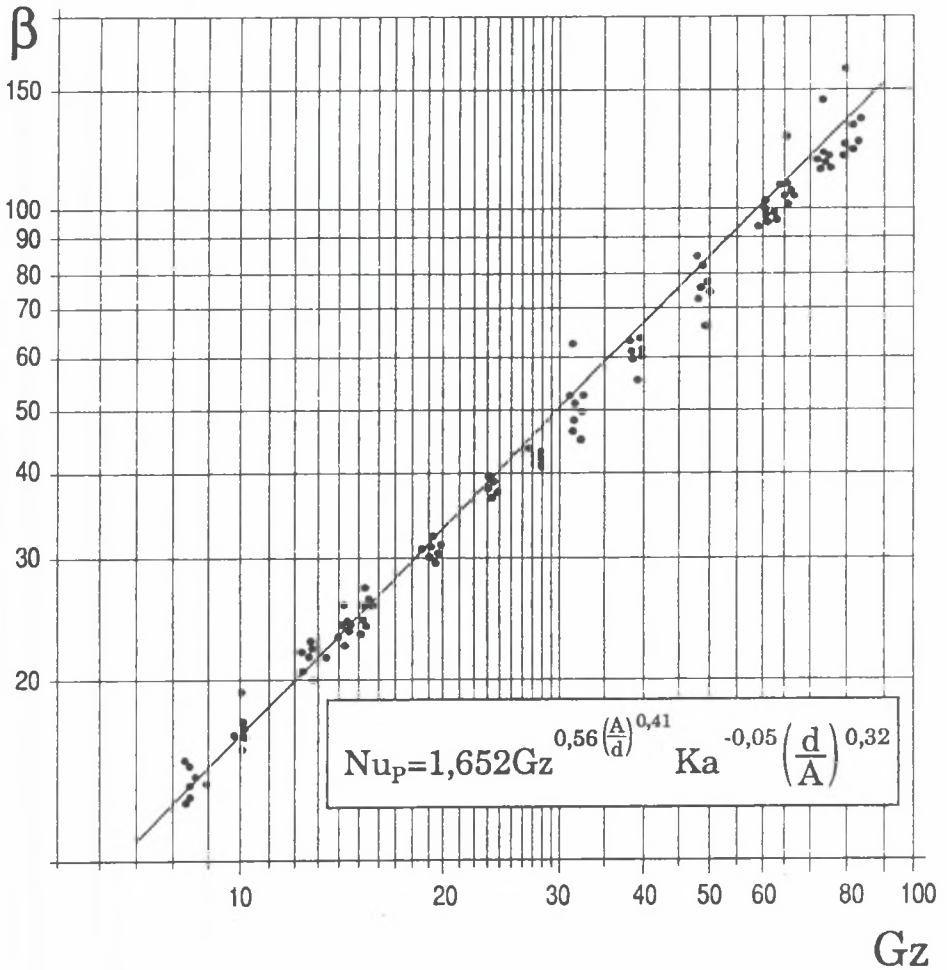
W celu graficznego pokazania rozrzutu punktów pomiarowych równanie (23) pomnożono i podzielono przez liczbę (Gz):

$$Nu_p = 1,652 Gz^{0,56} \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} Ka^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32} Gz Gz^{-1} \quad (26)$$



$$1,652 Gz = \frac{Nu_p}{Gz \left[ 0,56 \left( \frac{A}{d} \right)^{0,41} - 1 \right] Ka^{-0,05} \left( \frac{d}{A} \right)^{0,32}} = \beta \quad (27)$$

Równanie (23) przedstawiono graficznie jako funkcję  $\beta = f(Gz)$ .



Rys. 2.18. Rozrzut punktów pomiarowych, rura doświadczalna poddana drganiom  
 Fig. 2.18. Dispersion of measuring points, test pipe exposed to vibrations

Odrzucając wartości skrajne (prawdopodobieństwo 95 [%]) rozrzut punktów pomiarowych wynosi  $\pm 10$  [%], co jest zbliżone do obliczeń przedziału ufności dla równania (23).

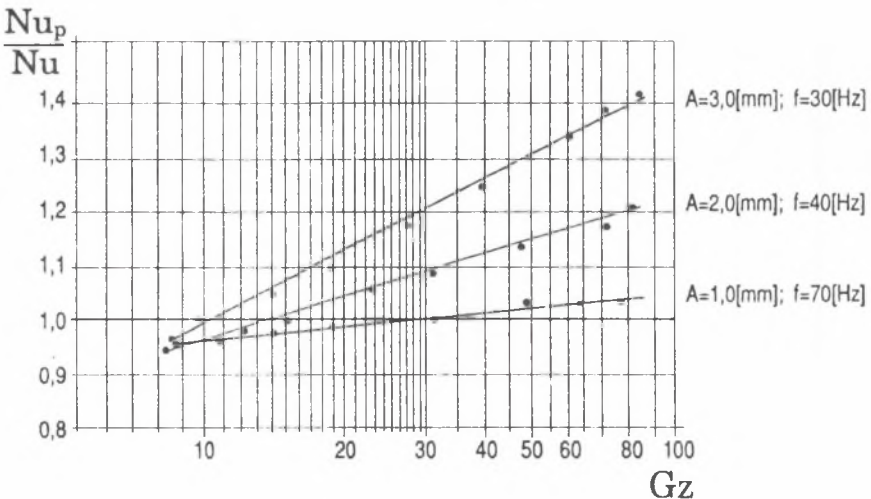
Analizując układ punktów pomiarowych na rys. 2.13 ÷ 2.16 we wszystkich przypadkach wartości liczby ( $Nu_p$ ), gdy ( $Gz$ ) zbliża się do 40 nieco maleje, aby później rosnąć przy wzroście ( $Gz$ ). Tworzenie się tej "zapaści" liczby ( $Nu_p$ ) należy tłumaczyć powstałymi drganiami zbliżonymi do częstotliwości którejś z harmonicznych drgań przepływającej cieczy.

Aby określić wpływ drgań wymuszonych na wymianę ciepła w porównaniu do rury w spoczynku, określono stosunek:

$$\frac{Nu_p}{Nu} = \frac{1,652 Gz^{0,56} \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} K\alpha^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32}}{2,20 Gz^{0,22}} \quad (28)$$

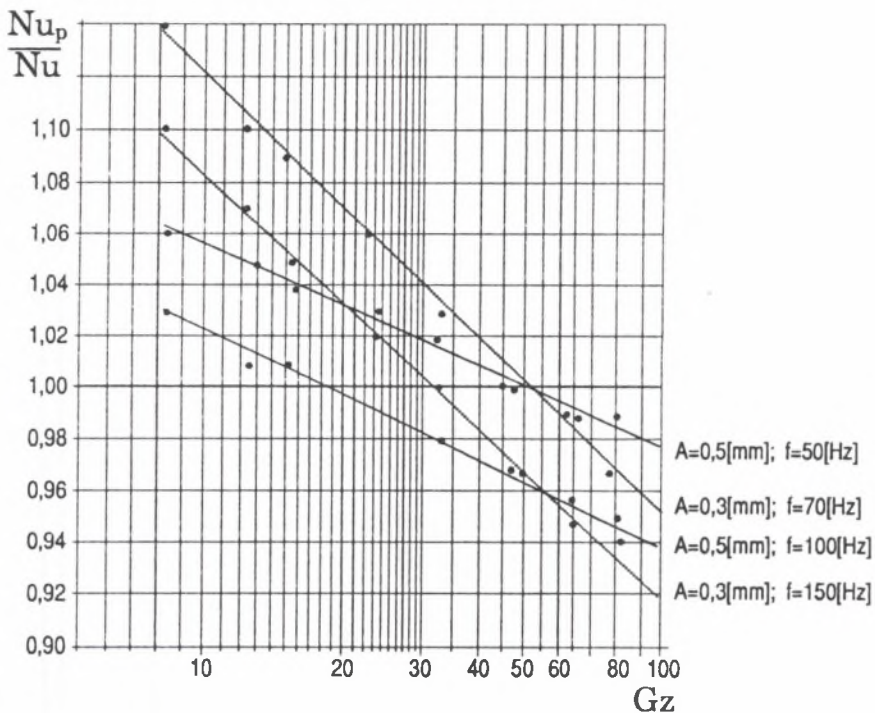
$$\frac{Nu_p}{Nu} = 0,751 Gz \left[ 0,56 \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} - 0,22 \right] K\alpha^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32} \quad (29)$$

Dla równania (29) wykonano wykresy funkcji  $\frac{Nu_p}{Nu} = f(Gz)$ .



Rys. 2.19. Analiza funkcji  $Nu_p/Nu = f(Gz)$  dla  $A = 1,0 \div 3,0$  [mm]

Fig. 2.19. Analysis of the function  $Nu_p/Nu = f(Gz)$  for  $A = 1,0 \div 3,0$  [mm]



Rys. 2.20. Analiza funkcji  $Nu_p/Nu = f(Gz)$  dla  $A = 0,3 + 0,5$  [mm]  
 Fig. 2.20. Analysis of the function  $Nu_p/Nu = f(Gz)$  for  $A = 0,3 + 0,5$  [mm]

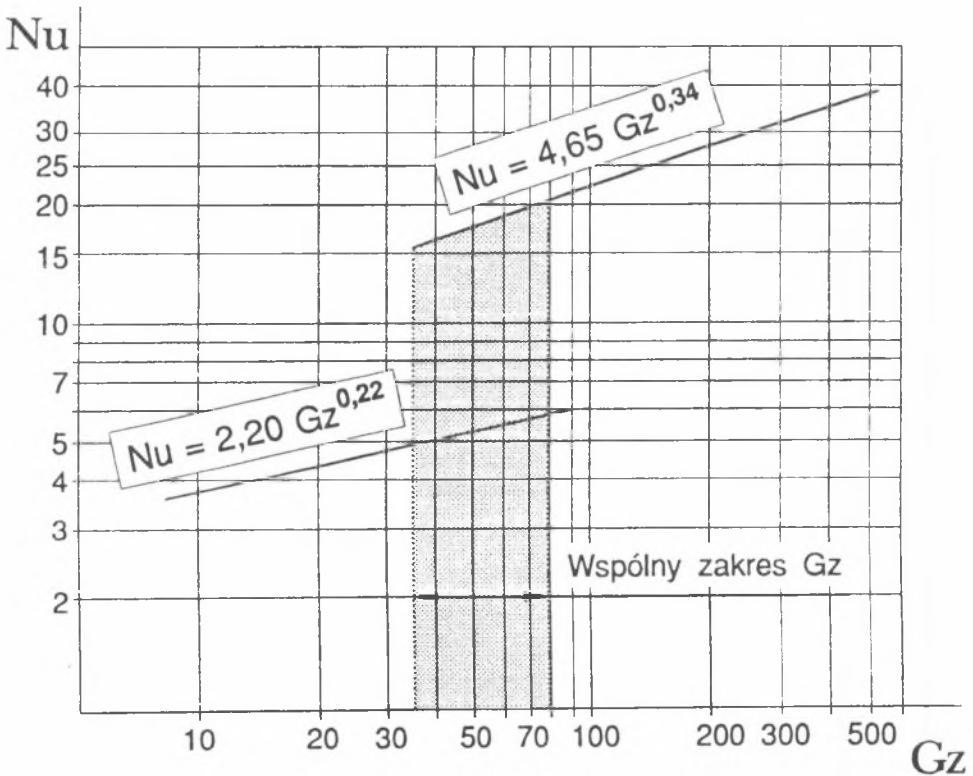
Wartość stosunku  $\left(\frac{Nu_p}{Nu}\right)$  zależy przede wszystkim od amplitudy ( $A$ ), nato-

miast bardzo niewiele od częstotliwości ( $f$ ). Wzrost częstotliwości w badanym przypadku nieco pogorszał wymianę ciepła (wykładnik potęgowy liczby ( $Ka$ ) jest ujemny). Badania wymiany ciepła przy amplitudach  $1,0 \div 3,0$  [mm] potwierdziły hipotezę postawioną w pracy [11] sugerującą, że drgania o wyższej amplitudzie mogą spowodować wzrost wymiany ciepła w granicach do 40 [%]. Badania wymiany ciepła przy amplitudach  $0,3 \div 0,5$  [mm] wykazały, że ze wzrostem liczby ( $Gz$ ) pogarsza się wymiana ciepła. Przy bardzo wolnych przepływach drgania te nieco poprawiają wymianę ciepła w granicach od 3 do 14 [%]. Tendencja pogarszania się wymiany ciepła ze wzrostem liczby ( $Gz$ ), przy małych amplitudach wystąpiła również w badaniach opisanych w pracy [11].

## 10. Opis procesu wymiany ciepła w przepływie laminarnym przy użyciu liczby (Gz)

Przyjmuje się, że stosowanie liczby (Gz) w opisie wymiany ciepła przy przepływie laminarnym daje wystarczająco dobre wyniki. W tym celu postanowiono porównać dwa układy wymiany ciepła zbadane przez autora i opisane za pomocą liczby (Gz).

Układ pierwszy to wymiennik para – woda, gdzie para ogrzewała wodę przepływającą przez poziomą rurę [11]. Układ drugi jest opisany w niniejszej pracy, woda chłodzona powietrzem płynie rurą pionową. Na rys. 2.21 pokazano wykresy równań korelacyjnych w funkcji  $Nu = f(Gz)$  dla obydwu układów.



Rys. 2.21. Wspólny zakres (Gz) dla dwóch przykładów wymiany ciepła przy przepływie laminarnym  
Fig. 2.21. Common range of (Gz) number for two examples of heat transfer by laminar flow

Zbadane zakresy liczby (Gz) mają wspólny obszar dla obydwu układów. W obszarze tym obserwujemy dużą niezgodność liczby (Nu). Z faktu tego można wyciągnąć wniosek, że dla danego układu opis wymiany ciepła jedynie przy użyciu liczby (Gz) daje zadowalające wyniki, jeżeli w czasie doświadczeń liczba (Gr) zmieniała się w wąskim zakresie. Dla układu pierwszego gdzie badano poziomą rurę, wartość (H) w liczbie (Gr) wynosiła 6,8 [mm], czyli średnicę rury. Dla tego przypadku  $5,43 \cdot 10^5 \leq Gr \leq 6,05 \cdot 10^5$ .

Dla układu drugiego, gdzie rura doświadczalna była pionowa, wartość (H) wynosiła 204 [mm], czyli długość odcinka pionowego. Liczba (Gr) dla tego układu była zawarta w przedziale

$$3,18 \cdot 10^9 \leq Gr \leq 6,70 \cdot 10^9$$

We wszystkich przypadkach liczba (Gr) była liczona przy założeniu:

$$\Delta t = t_{sc} - t_{sr} \quad (30)$$

Wszystkie wielkości fizyczne przepływającego medium przyjęto dla temperatury:

$$\frac{t_{sc} + t_{sr}}{2}$$

Aby jednym równaniem opisać oba układy wymiany ciepła założono, że równanie korelacyjne będzie miało postać:

$$Nu = C Re^a Pr^b Gr^c \quad (31)$$

W celu określenia liczb (Re i Pr) wielkości fizyczne przyjęto dla średniej temperatury przepływającego medium.

Logarytmując równanie (31) dla 70 pomiarów, sporządzono krakowian podstawowy, który podniesiony do kwadratu podany jest w tablicy 12.

Krakowian (A)

	1	2	3	4	5	suma
1	70.0000	200.8730	32.1610	587.2660	64.9470	955.2470
2	200.8730	582.0070	93.3110	1673.7200	189.7590	2739.6700
3	32.1610	93.3110	17.0010	246.4600	33.9360	422.8690
4	587.2660	1673.7200	246.4600	5179.6100	500.7290	8187.7850
5	64.9470	189.7590	33.9360	500.7290	68.4020	857.7730
suma	955.2470	2739.6700	422.8690	8187.7850	857.7730	

Krakowian pierwiastkowy podano w tablicy 13.

Tablica 13

Krakowian  $r = \sqrt{A}$

	1	2	3	4	5	suma
1	8.3666	24.0089	3.8440	70.1917	7.7627	114.1739
2	0	2.3621	0.4321	-4.8975	1.4301	-0.6732
3	0	0	1.4274	-14.8807	2.4366	-11.0167
4	0	0	0	2.7045	-0.3276	2.3769
5	0	0	0	0	0.2290	0.2290

sprawdzenie
114.1739
-0.6870
-11.0173
2.3952

Wartości podane w tablicy 13 pozwalają wyliczyć niewiadome w równaniu (31).

$$8,3666 \lg C + a \cdot 24,0089 + b \cdot 3,8440 + c \cdot 70,1917 - 7,7627 = 0 \quad (32)$$

$$a \cdot 2,3621 + b \cdot 0,4321 - c \cdot 4,8975 - 1,4301 = 0 \quad (33)$$

$$b \cdot 1,4274 - c \cdot 14,8807 - 2,4366 = 0 \quad (34)$$

$$c \cdot 2,7045 - 0,3276 = 0 \quad (35)$$

Z równań (32 + 35) wyliczono

$$a = 0,27$$

$$b = 0,46$$

$$c = -0,12$$

$$C = 8,745$$

Po wstawieniu wartości wyliczonych równanie (31) będzie miało postać

$$Nu = 8,745 \cdot Re^{0,27} Pr^{0,46} Gr^{-0,12} \quad (36)$$

Błąd standardowy pojedynczego równania:

$$s_o = \frac{0,2290}{\sqrt{70-4}} = 0,02818 \quad (37)$$

Dla prawdopodobieństwa 95 [%] i 70 równań obserwacyjnych współczynnik Studenta wynosi 2,0 [17].

Wartość przedziału ufności dla równania (36) wynosi:

$$\Delta \lg Nu = 2,0 \cdot 0,02818 = \pm 0,0564 \quad (38)$$

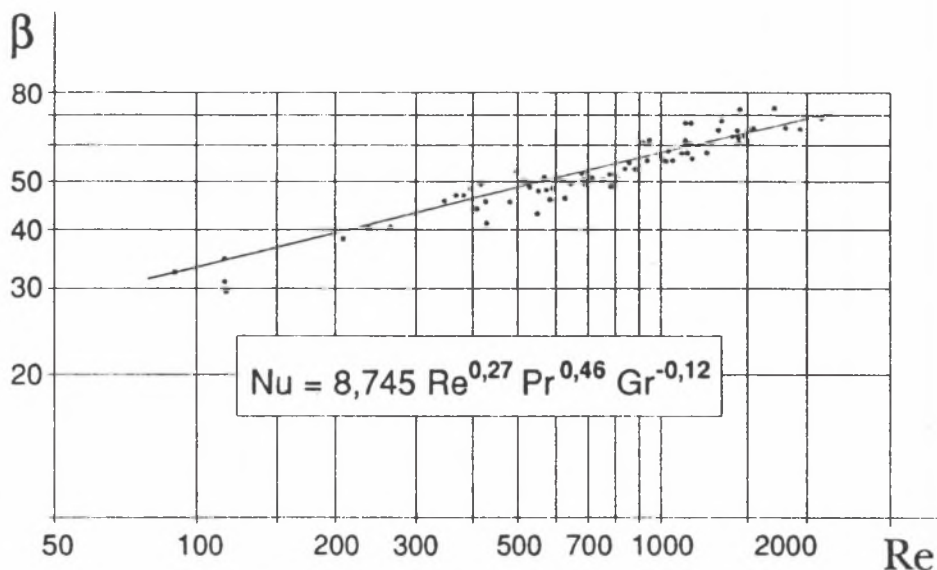
$$0,87 \leq \frac{Nu}{Nu} \leq 1,13$$

Dokładność równania (36) przy prawdopodobieństwie 95 [%] wynosi  $\pm 13$  [%].

W celu graficznego pokazania rozrzutu punktów pomiarowych równanie (36) przekształcono:

$$8,745 Re^{0,27} = \frac{Nu}{Pr^{0,46} Gr^{-0,12}} = \beta \quad (39)$$

Równanie (39) przedstawiono graficznie jako funkcję  $\beta = f(Re)$



Rys. 2.22. Rozrzut punktów pomiarowych dla obydwóch przykładów wymiany ciepła przy przepływie laminarnym

Fig. 2.22. Dispersion of measuring points for two examples of heat transfer by laminar flow

Rozrzut punktów pomiarowych po odrzuceniu wartości skrajnych wynosi  $\pm 12$  [%]. Wartość ta jest zbliżona do obliczonego przedziału ufności dla równania (36). Równanie (36) zostało zbadane w zakresie:

$$110 \leq Re \leq 2200$$

$$2,06 \leq Pr \leq 6,4$$

$$5,43 \cdot 10^5 \leq Gr \leq 6,70 \cdot 10^9$$

Większość autorów wprowadza liczbę (Gr) do opisu wymiany ciepła w ruchu laminarnym. Wprowadzenie jej pozwala na uwzględnienie wpływu konwekcji naturalnej.



## 11. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że drgania wymuszone pionowej rury chłodzonej powietrzem mają wpływ na wymianę ciepła przy przepływie laminarnym. W rurze doświadczalnej płynęła woda o temperaturze początkowej  $80 \pm 86$  [°C] w kierunku z góry na dół. Kierunek drgań był zgodny z przepływem wody. Aby wyniki pomiarów były porównywalne, wykonano pomiary wymiany ciepła w rurze w stanie spoczynku.

Wyprobowano na podstawie pomiarów równanie wymiany ciepła w rurze w stanie spoczynku:

$$Nu = 2,20 Gz^{0,22}$$

Równanie to jest ważne dla rury pionowej w zakresie  $8 \leq Gz \leq 80$ . Wykonane pomiary dla różnych amplitud i częstotliwości drgań dowiodły, że teoria podobieństwa w tym przypadku nie dała zadowalających wyników, bowiem kąt pochylenia prostych  $Nu_p = f(Gz)$  w układzie podwójnie logarytmicznym nie był taki sam dla różnych amplitud drgań.

Uwzględniając powyższy fakt, równanie korelacyjne opisujące wymianę ciepła w rurze poddanej drganiom ma postać:

$$Nu_p = 1,652 Gz^{0,56} \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} Ka^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32}$$

Równanie to jest ważne dla pionowej rury o długości  $L = 30d$  w zbadanym zakresie:

$$8 \leq Gz \leq 80$$

$$110 \leq Re \leq 1500$$

$$2,06 \leq Pr \leq 2,68$$

$$3300 \leq Ka \leq 20400$$

$$2,3 \leq \frac{d}{A} \leq 22,7$$

W tym przypadku wpływ częstotliwości na wymianę ciepła był niewielki, o czym świadczy wykładnik potęgowy liczby (Ka). Wykładnik ten ma wartość ujemną, czyli wyższe częstotliwości drgań wpływały negatywnie na wymianę ciepła.

Aby określić wpływ drgań wymuszonych na wymianę ciepła w stosunku do rury w spoczynku, określono stosunek:

$$\frac{Nu_p}{Nu} = 0,751Gz \left[ 0,56 \left( \frac{A}{d} \right)^{0,41} - 0,22 \right] K\alpha^{-0,05} \left( \frac{d}{A} \right)^{0,32}$$

który pokazano graficznie jako funkcję  $\frac{Nu_p}{Nu} = f(Gz)$ .

Stwierdzono, że w badanym przypadku drgania o amplitudach  $1,0 \leq A \leq 3,0$  [mm] poprawiły wymianę ciepła w miarę wzrostu (Gz) nawet do 40 [%]. Drgania natomiast o amplitudach  $0,3 \leq A \leq 0,5$  [mm] pogorszyły wymianę ciepła gdy rosła wartość liczby (Gz).

Dokładność przeprowadzonych pomiarów i równań korelacyjnych określono na podstawie:

- prawa dodawania błędów losowych, wielkość błędu oszacowano na 9,2 [%];
- średniego błędu standardowego pojedynczego równania dla prawdopodobieństwa 95% (rachunek krakowianowy), wielkość błędu oszacowano na  $\pm 8$  [%];
- rozrzutu wszystkich punktów pomiarowych po odrzuceniu wartości skrajnych, wartość błędu oszacowano na  $\pm 10$  [%]. Uzyskane wyniki potwierdziły badania opisane w pracy [11].

Postawiony na wstępie cel niniejszej pracy osiągnięto, został zbadany wpływ drgań o większej amplitudzie. Wyniki badań potwierdziły postawioną w pracy [11] hipotezę, że drgania o większej amplitudzie mogą poprawić wymianę ciepła.

W pracy tej przeanalizowano również możliwość opisu procesu wymiany ciepła w rurach pionowych i poziomych nie poddanych drganiom. Można stwierdzić, że jeżeli liczba (Gr) w czasie całego zakazu badań zmienia się w niewielkim zakresie, to opis wymiany ciepła przy użyciu liczby (Gz) daje zadowalające wyniki.

Uwzględniając powyższe obserwacje, wyprowadzono równanie korelacyjne dla przepływu laminarnego wykorzystując badania obecne oraz badania podane w pracy [11]:

$$\text{Nu} = 8,745 \text{ Re}^{0,27} \text{ Pr}^{0,46} \text{ Gr}^{0,12}$$

Zakres zbadany:

$$110 \leq \text{Re} \leq 2200$$

$$2,06 \leq \text{Pr} \leq 6,4$$

$$5,43 \cdot 10^5 \leq \text{Gr} \leq 6,70 \cdot 10^9$$

Równanie to daje zadowalające wyniki tak dla rury poziomej, jak i pionowej. Dokładności równania oszacowano na  $\pm 12$  [%].

**Literatura**  
**rok 1993 - 1997**

1. **Acharya S.; Dutta S.; Myrum T.A.; Baker R.S.:** Periodically developed flow and heat transfer in a ribbed duct. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36 (8) (1993) 269-2082.
2. **Antohe B.V.; Lage J.L.:** Experimental Investigation on Pulsating Horizontal Heating of a Water-Filled Enclosure. *Heat Transfer, ASME*, 118 (1996) 889-896.
3. **Chin-Hsiang Cheng.; Jing-Lia Hong.:** Numerical prediction of lock-on effect on convective heat transfer from a transversely oscillating circular cylinder. *Int. J. Heat Mass Transfer* 40 (8) (1997) 1825-1834.
4. **Du C.; Turton R.:** An experimental study of the heat transfer between near-fluidized particles and an oscillating immersed surface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40 (10) (1997) 2351-2361.
5. **Hazra S.B.; Gupta A.S.; Niyogi P.:** On the dispersion of a solute in oscillating flow through a channel. *Heat and Mass Transfer*, 31 (1996) 249-256.
6. **Ho C.J., Chu C.H.:** Periodic melting within a square enclosure with an oscillatory surface temperature. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36 (3) (1993) 725-733.
7. **Jae Hwa Chung; Jae Min Hyun.:** Heat transfer from a fully-developed pulsating flow in a curved pipe. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37 (1) (1994) 43-52.
8. **Jung-IL Choi; Hyung Jin Sung:** Suppression of temperature oscillation in Czochralski convection by superimposing rotating flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40 (7) (1997) 1667-1675.
9. **Jyh-Chen; Farn-Shiun Hwa:** Oscillatory thermocapillary flow in a rectangular cavity. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36 (15) (1993) 3743-3749.
10. **Khrantsov P.P.; Martynenko O.G.; Burak V.S.; Shikh I. A.:** Stable vortex structures in axisymmetric convective torch during oscillating combustion. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39 (7) (1996) 1519-1525.

11. **Klaczak A.:** Interpretacja wpływu drgań wymuszonych i samowzbudnych na wymianę ciepła. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 4 (1994) ss 123.
12. **Klaczak A.:** Report from experiments on heat transfer by forced vibrations of exchangers. Heat and Mass Transfer (1997).
13. **Klaczak A.:** Heat transfer in forced vibrated pipe by laminar flow. (w druku)
14. **Lee T.L.; Lin T.F.:** Transient oscillatory conjugate natural convection in a tall water cavity. Wärme und Stoffübertragung, 29 (1993) 95-105.
15. **Liao Q.D.; Yang K.T.; Nee V.W.:** An analysis of conjugate heat transfer from a heated wall in a channel with zero-mean oscillatory flow for small oscillatory flow Reynolds number. Int. J. Heat Mass Transfer, 37 (1) (1994) 415-423.
16. **Lyubimov D.V.; Cherepanov A.A.; Lyubimova T.P.; Roux B.:** The flows induced by a heated oscillating sphere. Int. J. Heat Mass Transfer, 38 (11) (1995) 2089-20100.
17. **Machej K.:** Zastosowanie krakowianów do opracowania wyników doświadczeń w inżynierii chemicznej. Chemia stosowana. T.VII. z.1. (1963) 23-40.
18. **Moschandreou T.; Zamir M.:** Heat transfer in a tube with pulsating flow and constant heat flux. Int. J. Heat Mass Transfer 40 (10) (1997) 2461-2466.
19. **Or A.C.; Kelly R.E.:** Onset of Marangoni convection in a layer of fluid modulated by a weak nonplanar oscillatory shear. Int. j. Heat Mass Transfer, 38(12) (1995) 2269-2279.
20. **Roetzel W., Sarit K. Das, Luo X.:** Measurement of the heat transfer coefficient in plate heat exchangers using a temperature oscillation technique. Int. J. Heat Mass Transfer, 37 (1) (1994) 325-321.
21. **Shigefumi Nishio; Xiao-Hong Shi; Wei-Min Zhang:** Oscillation-induced heat transport: heat transport characteristics along liquid-columns of oscillation-controlled head transport tubes. Int. J. Heat Mass Transfer, 38 (13) (1995) 2457-2470.
22. **Sai-Shou Chang; Tsing-Fa Lin:** Steady and oscillatory opposing mixed convection in a symmetrically heated vertical channel with a low-Prandtl number fluid. Int. J. Heat Mass Transfer 36 (15) (1993) 3783-3795.
23. **Sing-Fa Lin; Tsai-Shou Chang; Yu-Feng Chen:** Development of Oscillatory Asymmetric Recirculating Flow in Transient Laminar Opposing Mixed Convection in a Symmetrically Heated Vertical Channel. Heat Transfer, ASME, 115 (1993) 342-352.

- 24.Seo Young Kim; Byung Ha Kang; Jae Min Hyun:** Heat Transfer from pulsating flow in a channel filled with porous media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37 (14) (1994) 2025-2033.
- 25.Seo Young Kim; Byung Ha Kang; Jae Min Hyun:** Heat Transfer in the thermally developing region of a pulsating channel flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36 (17) (1993) 4257-4266.
- 26.Tiggelbeck St.; Mitra N.K.; Fiebig M.:** Experimental investigations of head transfer enhancement and flow losses in a channel with double rows of longitudinal vortex generators. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36 (9) (1993) 2327-2337.
- 27.Vitkin E.I.; Shuralyov S.L.; Tamanovich V.V.:** Radiation transfer in vibrationally nonequilibrium gases. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 38 (1) (1995) 163-173.
- 28.Yang G.; Dong Z.F.; Ebadian M.A.:** The Effect of Torsion on Convective Heat Transfer in a Helicoidal Pipe. *Heat Transfer ASME*, 115 (1993) 796-800.
- 29.Zajdel A.N.:** Elementarna ocena błędów pomiarów PWN Warszawa (1967) ss. 71.
- 30.Zhao T.S.; Cheng P.:** Oscillatory Heat Transfer in a Pipe Subjected to a Laminar Reciprocating Flow. *Heat Transfer, ASME*, 118 (1996) 592-597.
- 31.Zhixiong Guo; Hyung Jin Sung:** Analysis of the Nusselt number in pulsating pipe flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40 (10) (1997) 2486-2489.

## Wymiana ciepła przy przepływie laminarnym w rurze pionowej poddanej drganiom

### Streszczenie

W pracy tej autor omawia wyniki własnych badań dotyczących wymiany ciepła w pionowej rurze poddanej drganiom o częstotliwości  $30 \leq f \leq 150$  [Hz] i amplitudzie  $0,3 \leq A \leq 3,0$  [mm]. Rurą płynęła woda o temperaturze początkowej  $80 \div 86$  [°C]. Rura chłodzona była strumieniem powietrza o średniej prędkości  $29,8$  [m/s] i temperaturze  $20 \div 23$  [°C]. Przepływ wody w rurze doświadczalnej miał charakter laminarny w zakresie  $150 \leq Re \leq 1500$ .

Dla zakresu zbadanego wyprowadzono równanie korelacyjne

$$Nu_p = 1,652 Gz^{0,56} \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} Ka^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32}$$

Dla tej samej rury doświadczalnej będącej w spoczynku i tych samych zbadanych zakresów wyprowadzono równanie korelacyjne:

$$Nu = 2,20 Gz^{0,22}$$

W celu określenia wpływu drgań na wymianę ciepła przeanalizowano stosunek:

$$\frac{Nu_p}{Nu} = 0,751 Gz \left[ 0,56 \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} - 0,22 \right] Ka^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32}$$

Stwierdzono niewielki negatywny wpływ częstotliwości drgań na wymianę ciepła. W zakresie amplitud  $1,0 \leq A \leq 3,0$  [mm] zaobserwowano wzrost wymiany ciepła przy równoczesnym wzroście liczby (Gz), natomiast przy amplitudach  $0,3 \leq A \leq 0,5$  [mm] przy wzroście wartości liczby (Gz) następowało pogorszenie wymiany ciepła.



## Heat transfer in forced vibrated Vertical pipe by laminar flow

### Summary

Autor presents results of own research works. Investigations concern the vertical tube exposed to vibrations with frequency  $30 \leq f \leq 150$  [Hz] and amplitudes  $0,2 \leq A \leq 3,0$  [mm].

Water of initial temperature  $80+86$  [°C] was flowing through the tube which was cooled by air streaming with average velocity  $29,8$  [m/s] and temperature  $20+23$  [°C]. In the test tube laminar flow in range of  $120 \leq Re \leq 1500$  was maintained.

For the investigated range correlation equation was educed:

$$Nu_p = 1,652 Gz^{0,56} \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} Ka^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32}$$

For the same test pipe but in state of rest and for the same investigated range correlation equation was educed:

$$Nu = 2,20 Gz^{0,22}$$

To state influence of forced vibrations on heat transfer following relation was analysed:

$$\frac{Nu_p}{Nu} = 0,751 Gz \left[ 0,56 \left(\frac{A}{d}\right)^{0,41} - 0,22 \right] Ka^{-0,05} \left(\frac{d}{A}\right)^{0,32}$$

Only a little negative influence of vibration frequency on the heat transfer was stated. In the range of amplitudes  $1,0 \leq A \leq 3,0$  [mm] increase of heat transfer by the simultaneous growth of the number (Gz) was observed, whereas by amplitudes  $0,3 \leq A \leq 0,5$  [mm] and increase of value of the number (Gz) followed deterioration of heat transfer.