

Andrzej MROWIEC¹

EKSPERYMENTALNE OKREŚLENIE MIEJSCOWYCH STRAT CIŚNIENIA W PRZEPŁYWOMIERZACH KOLANOWYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, pozwalające na wyznaczenie zastępczego współczynnika oporów miejscowych dla przepływomierzy kolanowych w funkcji średniego względnego promienia gięcia R/d przy przepływie turbulentnym cieczy w zakresie $5000 < Re < 30000$. Przepływomierze kolanowe wykonane są z kalibrowanych rur stalowych i stosowane w instalacjach zasilania paliwem lotniczych silników odrzutowych. Uzyskane w trakcie badań eksperymentalnych wartości współczynników strat miejscowych, różnią się od wartości podawanych w literaturze przedmiotu, co wskazuje na potrzebę przeprowadzenia dalszych badań.

1. WPROWADZENIE

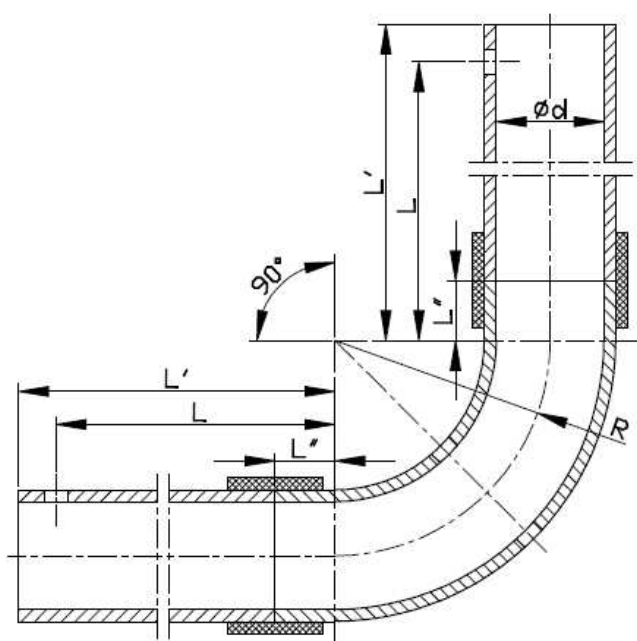
Podczas przepływu cieczy rzeczywistej w przewodach prostoliniowych powstają opory przepływu spowodowane lepkością cieczy. Na pokonanie tych oporów zużywana jest pewna część energii płynącej strugi, którą nazwano stratami hydraulicznymi, ponieważ ulega rozproszeniu głównie w postaci wydzielonego w czasie przepływu ciepła. Straty te podzielono na straty liniowe i straty miejscowe (lokalne), występujące w tych miejscach przewodu, gdzie powstają zaburzenia w normalnym rozkładzie profilu prędkości [3]. Podczas przepływu płynu w zakrzywionych przewodach kolanowych występują deformacje profilu prędkości, związane między innymi z oporami tarcia na ściankach i działaniem sił bezwładności. Straty wywołane tarcie cieczy o ścianki w połączeniu ze zmianą kierunku przepływu prowadzą do oderwania strugi od ścianki przewodu w warstwie przyściennej i sprzyjają tworzeniu wirów na wewnętrznym i zewnętrznym promieniu krzywizny wzdłuż płynącej strugi. Natomiast odśrodkowa siła bezwładności w przekroju poprzecznym na dwusiecznej kąta zagięcia kolana powoduje wytworzenie poprzecznego wiru podwójnego, zwiększającego dodatkowo straty przepływu. W pewnej odległości za kolaniem struga odzyskuje stabilność. Intensywność występujących zjawisk w przepływomierzach kolanowych zależy głównie od średnicy wewnętrznej kanału osiowosymetrycznego, średniego promienia gięcia kolana, chropowatości ścian kolana i liczby Reynoldsa uwzględniającej siłę bezwładności i lepkość płynącej cieczy.

¹ Katedra Mechaniki i Budowy Maszyn, Wydział Politechniczny PWSZ w Kaliszu, E-mail: a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl

2. BUDOWA PRZEPŁYWOMIERZY KOLANOWYCH

Do badań doświadczalnych, pozwalających na wyznaczenie miejscowych strat ciśnienia, przepływomierze kolanowe wykonano z kalibrowanych rur ze stali nierdzewnej o wewnętrznej średnicy nominalnej: $d = 11,2\text{mm}$ (oznaczone jako $K1...K4$) i $d = 14,25\text{mm}$ (oznaczone jako $K5...K9$), przy średnich promieniach gięcia kolan R/d , stosowanych w instalacjach zasilania paliwem lotniczych silników odrzutowych. Badane przepływomierze kolanowe zbudowano z dwóch prostych kanałów osiowoosymetrycznych (wlotowy i wylotowy) o długościach L' i znajdującego się między nimi łuku kolana (kolano pomiarowe) o kącie gięcia 90° wg rys. 1.

Ze względu na wewnętrzną średnicę rurociągów przyjęto długości odcinków prostych L ($L = 150\text{mm}$ dla $K1...K4$ i $L = 200\text{mm}$ dla $K5...K9$) służących do stabilizacji przepływu przed i za kolaniem. Występujące odmienne geometrie badanych kolan i zróżnicowane zaburzenia przy przepływie cieczy, stanowią źródło do wyznaczania zastępczych strat miejscowych w badanych przepływomierzach kolanowych jako całości.



Oznaczenie przepływomierza	Względny promień R/d
$K1$	1,70
$K2$	2,30
$K3$	3,53
$K4$	5,93
$K5$	2,30
$K6$	2,74
$K7$	2,96
$K8$	5,74
$K9$	11,53

Rys. 1. Budowa przepływomierza kolanowego
Fig. 1. Elbow flowmeter construction

Przedstawione w literaturze i stosowane w obliczeniach hydraulicznych równania, wg których oblicza się wartości współczynnika oporów miejscowych ζ , nie uwzględniają ani zmian rozkładów prędkości ani ciśnienia, a tym samym zaburzeń przepływu w kolanie. Mimo to, tak obliczone wartości współczynnika oporów miejscowych podawane są w literaturze i stosowane w obliczeniach inżynierskich. W związku z tym postanowiono doświadczalnie wyznaczyć rzeczywiste wartości zastępczych współczynników oporów

miejscowych ζ dla badanych przepływomierzy kolanowych. Zależności te zależą od charakterystycznych parametrów geometrycznych przepływomierzy jak: d , R , L i hydrodynamicznych warunków przepływu, które charakteryzuje liczba Reynoldsa [2]. Kolana w badanych przepływomierzach charakteryzują się cechami odmiennymi od tradycyjnie stosowanych w układach hydrauliki wodnej. Są wykonywane z rur ze stali nierdzewnej jako elementy instalacji zasilania paliwem silników lotniczych. Do najważniejszych cech, które również należy uwzględnić, zaliczamy chropowatość powierzchni kanału osiowosymetrycznego, przez który przepływa ciecz oraz geometrię wykonania samego kolana jako przepływomierza, które to cechy decydują o hydrodynamice przepływu. Powoduje to potrzebę weryfikacji przyjmowanych do obliczeń inżynierskich, wartości współczynników oporów miejscowych w oparciu o normy, w których jest podawana na ogół jedna wartość współczynnika strat miejscowych ζ , dla poszczególnych kolan i łuków giętych, w zależności od średnicy nominalnej przekroju poprzecznego, średniego promienia gięcia i chropowatości powierzchni wewnątrz kanału.

3. DOŚWIADCZALNE WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA STRAT MIEJSCOWYCH

Podstawowa metoda określania wartości współczynnika oporów miejscowych polega na pomiarze różnicy ciśnień przed i za przepływomierzem (przeszkodą) między przekrojami blisko położonymi względem siebie, tak aby można było pominąć straty liniowe. Wówczas, podobnie jak w rozważaniach teoretycznych, pojawia się problem zaburzenia rozkładu prędkości wywołanego oddziaływaniem bezwładności przy przepływie cieczy przez kolano. Eliminacja takiego zaburzenia wymusza zatem umieszczenie przekrojów pomiarowych w tak dużych odległościach przed i za kolaniem, aby profile prędkości były już w pełni uformowane (rys. 1). Takie założenie wprowadza oprócz oporów miejscowych, dodatkowe opory liniowe, które w przepływomierzu kolanowym jako całości, zastępuje się zastępczym współczynnikiem oporów miejscowych dla całego przepływomierza.

W celu wyznaczenia rzeczywistych wartości zastępczych współczynników oporów miejscowych ζ badanych przepływomierzy kolanowych, wykorzystano stanowisko do pomiaru przepływu, na którym przeprowadzono przepływowe badania hydrauliczne. Mierzono strumień masy przepływającej przez układ pomiarowy cieczy (wody) q_m metodą wagową oraz stratę ciśnienia Δp_s (w punktach odległych o L od końca i początku zakrzywienia) na przepływomierzu kolanowym, jako całości, przetwornikiem różnicy ciśnień. Do obliczenia zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ przepływomierza kolanowego wykorzystano równanie [3]:

$$\zeta = \frac{\pi^2 \cdot d^4 \cdot \rho \cdot \Delta p_s}{8 \cdot q_m^2} \quad (1)$$

gdzie:

- d - średnica wewnętrzna przekroju poprzecznego kanału osiowosymetrycznego w m,
- ρ - gęstość przepływającej cieczy w kg/m^3 ,

Δp_s - strata ciśnienia na przepływowomierzu kolanowym w Pa,

q_m - strumień masy przepływającej cieczy w kg/s.

W czasie badań hydraulicznych postanowiono sprawdzić, dla wybranego układu przepływowomierza kolanowego K5, jaki wpływ na wartość zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ , mają otwory poboru ciśnienia (piezometryczne), znajdujące się na zewnętrznym i wewnętrznym łuku kolana.



Rys. 2. Widok układu kolana przepływowomierza K5 bez otworów piezometrycznych

Fig. 2. Aspect of the elbow flowmeter K5 system without piezometric apertures

Dlatego w pierwszej kolejności przebadano układ przepływowy przepływowomierza z kolanem K5 bez wykonanych otworów piezometrycznych, którego widok przedstawiono na rys. 2. Następnie w kolanie K5 wykonano dwa otwory piezometryczne (o średnicy 1,5mm) na dwusiecznej kąta zagięcia, po jednym na zewnętrznym i wewnętrznym łuku gięcia, jak w typowym przepływowomierzu kolanowym do zastosowań przemysłowych. Widok tak wykonanego układu pomiarowego przepływowomierza kolanowego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Widok układu kolana przepływowomierza K5 z dwoma otworami piezometrycznymi

Fig. 3. Aspect of the elbow flowmeter K5 system with two piezometric apertures

Dla tych dwóch przedstawionych układów pomiarowych przepływomierza kolanowego z kolaniem K5 wykonano badania doświadczalne. Pomiary przeprowadzono przy przepływie wody dla liczb Reynoldsa o wartości $Re \sim 19700$ i $Re \sim 33400$, wyznaczając wielkości zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ . Uśrednione wyniki końcowe (Re , v , ζ) dla wybranego przepływomierza kolanowego K5 otrzymane z przeprowadzonych pomiarów i obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

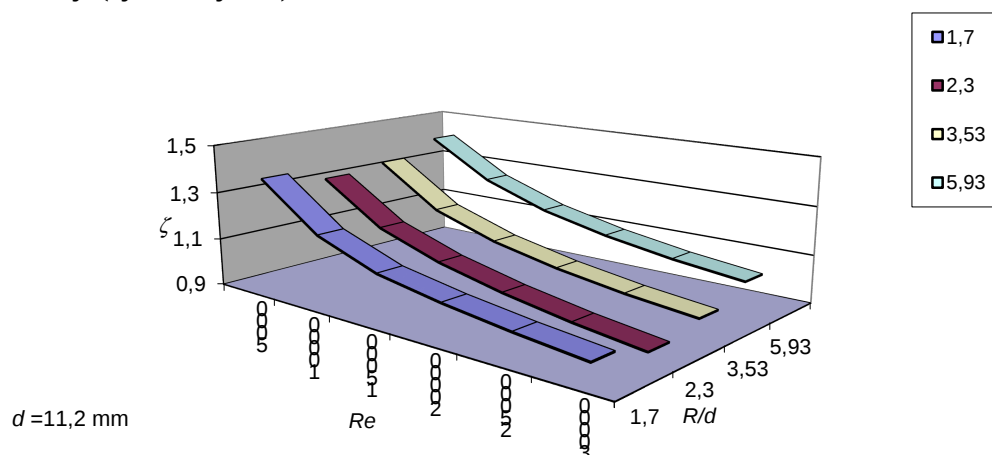
Tabela 1. Wpływ otworów piezometrycznych na wyznaczoną wartość uśrednionego zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ

Table 1. Influence of piezometric apertures on defined value of averaged vicarious local loss ratio ζ

Układ pomiarowy z:	v [m/s]	Re	ζ
Rys. 2	1,408	19608	0,740
	2,401	33424	0,624
Rys. 3	1,417	19725	0,743
	2,401	33425	0,627

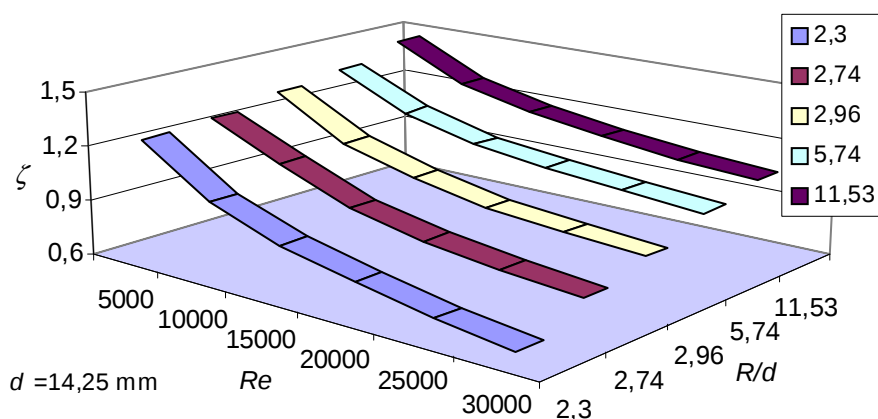
Z przeprowadzonych pomiarów i obliczeń wynika, że dla wybranego przepływomierza kolanowego K5 wartość zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ wzrasta o ok. 0,5% (w przypadku wykonania dwóch otworów piezometrycznych zgodnie z rys. 3) w stosunku do kolana bez wykonanych otworów piezometrycznych, dla przebadanych przepływów określonych liczbą $Re \sim 19700$ i $Re \sim 33400$.

Wyniki obliczeń zależności zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ , dla przebadanych przepływomierzy kolanowych (wg rys. 1), od względnego promienia gięcia R/d i liczby Reynoldsa przedstawiono w postaci wykresów $\zeta = f(Re)$, przy przepływającym strumieniu wody (rys. 4, rys. 5).



Rys. 4. Zależność zastępczego współczynnika ζ od R/d i Re przy przepływie wody przez przepływomierz kolanowy 90°, dla kanału o średnicy $d = 11,2$ mm

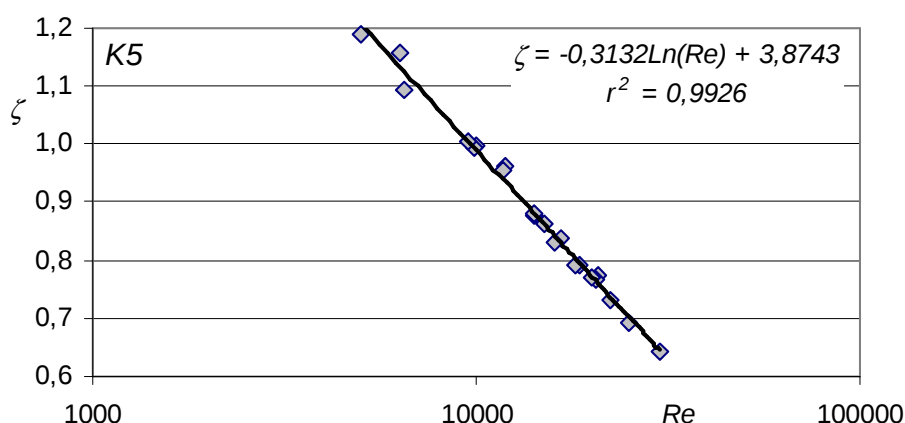
Fig. 4. Dependence of vicarious ratio ζ on R/d and Re at the water flow through 90° elbow flowmeter, to duct with $d = 11.2$ mm in diameter



Rys. 5. Zależność zastępczego współczynnika ζ od R/d i Re przy przepływie wody przez przepływomierz kolanowy 90° , dla kanału o średnicy $d = 14,25\text{mm}$

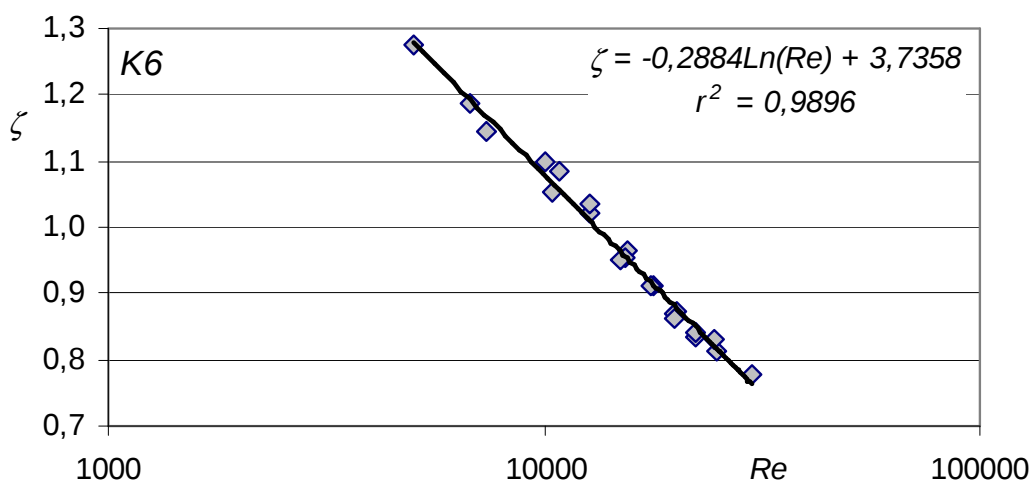
Fig. 5. Dependence of vicarious ratio ζ on R/d and Re at the water flow through 90° elbow flowmeter, to duct with $d = 14.25\text{mm}$ in diameter

Z wykresów widać, że zastępczy współczynnik oporów miejscowych ζ zmienia się w sposób zbliżony do kształtu przedstawionego w literaturze i przyjmuje najmniejsze wartości dla względnego promienia gięcia z przedziału $2,3 < R/d < 3,0$. Wyniki te otrzymano przy przepływie wody przez badane przepływomierze kolanowe w zakresie liczby Reynoldsa $5000 < Re < 30000$. Mimo tego, wyznaczone wartości zastępczego współczynnika strat miejscowych $\zeta > 0,6$ znacznie przekraczają wartości podawane w literaturze do stosowania w obliczeniach inżynierskich [1],[5]. Jednak wartości te, są zbieżne z wynikami badań i symulacji przeprowadzonymi przy przepływie wody przez kolana 90° [2]. Wyniki z przeprowadzonych badań zastępczego współczynnika strat miejscowych $\zeta = f(Re)$, dla wybranych przepływomierzy kolanowych (K5 do K7), przedstawiono w postaci punktów na wykresach pół-logarytmicznych (rys. 6 do rys. 8).

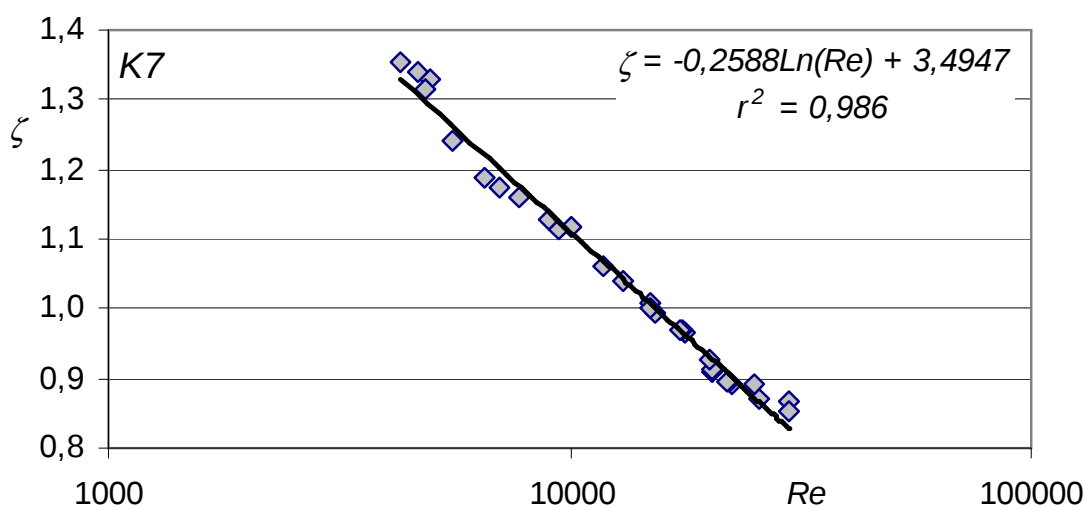


Rys. 6. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K5)

Fig. 6. Dependence of vicarious ratio ζ on Re , at the flow through elbow flowmeter (K5)



Rys. 7. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K6)
 Fig. 7. Dependence of vicarious ratio ζ on Re , at the flow through elbow flowmeter (K6)



Rys. 8. Zależność zastępczego współczynnika ζ od liczby Re , przy przepływie przez przepływomierz kolanowy (K7)
 Fig. 8. Dependence of vicarious ratio ζ on Re , at the flow through elbow flowmeter (K7)

Dodatkowo na wykresach przedstawiono wartości zastępczego współczynnika oporów miejscowych ζ w zależności od liczby Reynoldsa, wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów w postaci równania typu: $\zeta = -A_p \ln(Re) + B$ i wynikającą z tego równania linię trendu wraz ze współczynnikiem determinacji r^2 .

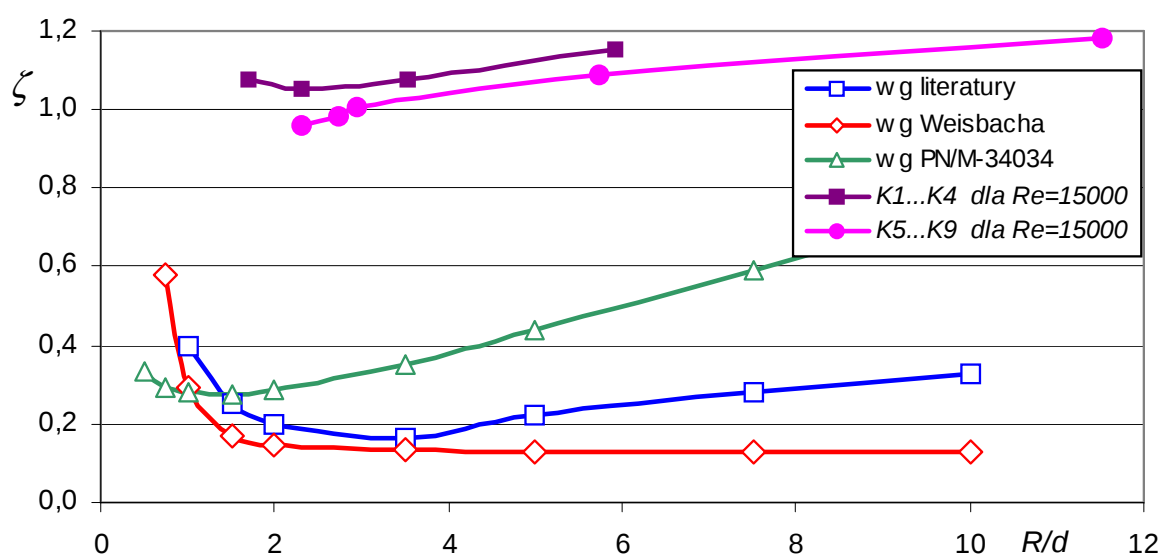
Wartości współczynników A_p , B , r^2 równań modeli trendu typu: $\zeta = -A_p \ln(Re) + B$, wyznaczonych indywidualnie dla każdego z przebadanych przepływomierzy kolanowych (K1 do K9), przedstawiono w tabeli 2.

Na rys. 9 przedstawiono w postaci wykresów wybrane zależności zastępczego współczynnika strat miejscowych ζ w funkcji względnego promienia gięcia R/d , dla

badanych przepływomierzy kolanowych $K1 \div K4$ ($d = 11,2\text{mm}$) i $K5 \div K9$ ($d = 14,25\text{mm}$) uzyskane przy przepływającym strumieniu wody, określonym liczbą $Re = 15000$.

Tabela 2. Wartości współczynników równania $\zeta = -A_p \ln(Re) + B$
Table 2. The values of ratio equation $\zeta = -A_p \ln(Re) + B$

Oznaczenie przepływomierza	Współczynnik proporcjonalności A_p	Wyraz wolny B	Współczynnik determinacji r^2
$K1$	0,2406	3,4048	0,9809
$K2$	0,2256	3,2131	0,9896
$K3$	0,2356	3,3368	0,9730
$K4$	0,2433	3,5022	0,9897
$K5$	0,3132	3,8743	0,9926
$K6$	0,2884	3,7358	0,9896
$K7$	0,2588	3,4947	0,9860
$K8$	0,2443	3,4542	0,9775
$K9$	0,2632	3,7279	0,9879



Rys. 9. Zależność współczynnika ζ od R/d przy przepływie przez kolano 90° i badane przepływomierze kolanowe, dla $Re = 15000$

Fig. 9. Dependence of ratio ζ on R/d at flow through 90° elbow and studied elbow flowmeters, for $Re = 15000$

Dla porównania na otrzymane wyniki doświadczalnie nałożono, na rys. 9, krzywe reprezentujące wartości współczynnika oporów miejscowych ζ , tylko dla samych kolan o kącie zagięcia 90° , które to zaczerpnięto z literatury [5] oraz obliczono z równania Weisbacha [1] i równań zamieszczonych w normie PN/M034034 [4].

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych wykazano, że wyznaczone wartości współczynnika oporów miejscowych ζ , dla przepływomierzy kolanowych:

- zależą głównie od względnego promienia gięcia R/d użytego kolana pomiarowego,
- maleją wg krzywej logarytmicznej ze wzrostem liczby Reynoldsa (dla przepływu turbulentnego),
- są ok. 2 do 5 razy większe od współczynnika oporów miejscowych ζ dla kolan 90° , w zależności od przyjętego względnego promienia gięcia R/d i przyjętych do obliczeń równań.

Podsumowując wnioski z przeprowadzonych badań doświadczalnych można stwierdzić, że najmniejsze wartości współczynnika oporów miejscowych ζ (minimalne straty ciśnienia) uzyskano przy względnym promieniu gięcia przepływomierza kolanowego, zawierającego się w granicach $2,3 \leq R/d \leq 2,96$, w przebadanym zakresie liczby Reynoldsa $5000 < Re < 30000$.

Ze względu na występujące różnice między wartościami współczynników strat miejscowych, uzyskanymi w trakcie badań eksperymentalnych, a wartościami podawanymi w literaturze przedmiotu istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych kompleksowych badań kolan uwzględniając: sposób ich wytworzenia, parametry geometryczne i hydrodynamiczne warunki przepływu cieczy.

LITERATURA

- [1] GRABARCZYK C., 1997, *Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe*, Envirotech, Poznań.
- [2] GRAJPER P., SMÓŁKA J., 2010, *Eksperymentalne i numeryczne określenie miejscowych strat ciśnienia w kolanie 90° instalacji wodociągowych*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 7-8, 13-19.
- [3] JEŻOWIECKA-KABSCH K., SZEWCZYK H., 2001, *Mechanika płynów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [4] NORMA PN-76/M-34034, *Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia*.
- [5] TULISZKA E., 1980, *Mechanika płynów*, PWN, Warszawa.

EXPERIMENTAL DEFINING OF LOCALISED PRESSURE LOSS IN THE STUDIED ELBOW FLOWMETERS

The article presented the results of experimental research which allow to assign the vicarious local resistance ratio for the studied elbow flowmeters, made of calibrated pipes used in the fuel powered installations of aircraft jet engines, in the function of average relative bend radius R/d at turbulent liquid flow, at Reynolds number $5000 < Re < 30000$. The experimental values of the coefficients losses local are different from the values given in the literature what are indicating on the need of conducting further research.