

Marek Kalenik

Rzeczywiste wartości współczynnika oporów miejscowych podczas przepływu wody przez zgrzewane kolana z polipropylenu

Kształtki, w tym łuki, kolana, trójniki, dyfuzory, konfuzyory czy zawory odcinające, są nieodzownymi elementami każdego systemu hydraulicznego. Przepływ cieczy przez kształtki łączące przewody jest bardziej skomplikowany niż przez ich proste odcinki [1]. Straty ciśnienia wywołane przez kształtki spowodowane są zakłóceniami przepływu cieczy, które występują podczas zmiany jego kierunku, nagłych lub stopniowych zmian przekroju lub kształtu rurociągu. Przewidywanie wysokości strat ciśnienia w kształtkach jest znacznie bardziej niepewne niż w przypadku rur prostych [2], a mechanizm przepływu cieczy wewnątrz kształtek nie jest jasno zdefiniowany.

W sieciach i instalacjach wodociągowych i ciepłowniczych stosuje się różne kształtki, które powinny być szczelne w miejscach połączeń, nie ulegać korozji, być odporne na oddziaływanie mechaniczne i chemiczne cieczy oraz umożliwiać przepływ cieczy przy jak najmniejszych oporach hydraulicznych (stratach hydraulicznych). Obecnie dostępne są kształtki z różnych materiałów (żeliwo, PVC, PE, PP) i są one łączone z rurociągami według różnych technologii. W literaturze naukowo-technicznej niewiele jest nowych publikacji, w których poruszane są zagadnienia związane z wyznaczaniem wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ) kształtek podczas przepływu cieczy newtonowskich [3–6].

Obecnie badacze zajmują się przede wszystkim modelowaniem matematycznym struktur przepływu różnych cieczy w kolanach o różnym stosunku promienia krzywizny do średnicy (R/D), a także w trójnikach, dyfuzorach i konfuzyorach [3, 5, 7]. Do modelowania struktur przepływu cieczy newtonowskich i nienewtonowskich wykorzystuje się oprogramowanie CFD (computational fluid dynamics), czyli tak zwaną numeryczną mechanikę płynów [1, 3, 8–10]. Matematyczne modelowanie takich struktur jest bardzo trudne, ponieważ przepływy wielofazowe zależą od wielu czynników i wielu zmiennych [2, 11–13].

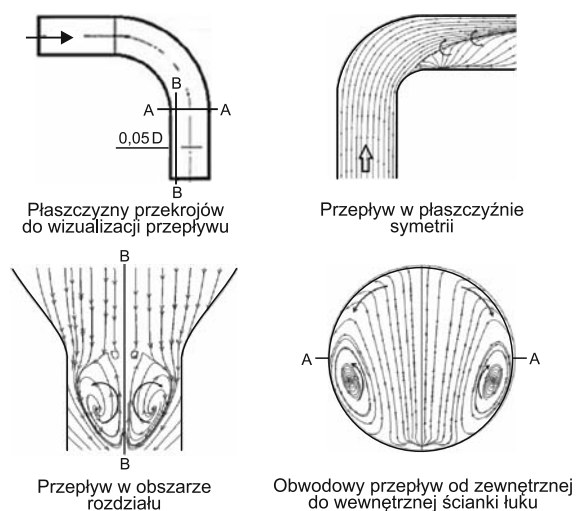
Autorzy pracy [3] przedstawili wyniki badań współczynników oporów miejscowych w dyfuzorach o kącie od $7,5^\circ$ do 40° i kolanach o stosunku promienia krzywizny do średnicy $R/D=1\div 10$. Badania wykonano z użyciem wody i dwóch płynów nienewtonowskich. Wyznaczone eksperymentalnie wartości współczynnika oporów miejscowych w dyfuzorach i kolanach porównano z wynikami obliczeń programem CFD. Stwierdzono, że wartości współczynnika

oporów miejscowych obliczone komputerowo były mniejsze od wyznaczonych w badaniach eksperymentalnych. Na tej podstawie badacze wysunęli sugestię, że mniejsze wartości współczynnika oporów miejscowych obliczone programem CFD najprawdopodobniej wynikały z przyjętego założenia, że wewnętrzna powierzchnia ścian dyfuzorów i kolan była hydraulicznie gładka, przy czym w rzeczywistości tak nie było.

Kolana rur są najważniejszą częścią każdego systemu sieci i instalacji wodociągowych, ponieważ zapewniają elastyczność w wyznaczaniu przebiegu trasy przewodów. Badania przepływu wody przez kolana mają ogromne znaczenie w zrozumieniu i poprawie ich przepustowości oraz minimalizacji strat hydraulicznych. Wiadomo, że przepływ lepkiej cieczy nieściśliwych [1], jak również ściśliwych gazów [7], przez kolana charakteryzuje się rozdziałem przepływu, występowaniem przepływów wtórnych i ogólnie dużą niestabilnością przepływu, przy czym jest on zależny od wartości liczby Reynoldsa, jak również promienia krzywizny kolana.

Podczas przepływu cieczy przez kolano powstaje radialny gradient ciśnienia wywołany siłą odśrodkową działającą na ciecz. Wówczas wewnątrz kolana obserwuje się podwójne spiralne pole przepływu i parę przeciwnych wirów, ponieważ obecność gradientu ciśnienia powoduje, że ciecz w środku kolana przesuwana się w kierunku ścianki zewnętrznej łuku i wraca wzdłuż ścianki kolana w kierunku wewnętrznej ścianki łuku. Jeżeli stosunek promienia krzywizny do średnicy kolana jest bardzo mały ($R/D \leq 1,5$), wówczas niekorzystny gradient ciśnienia w pobliżu ścianki wewnętrznej łuku i bezpośrednio za łukiem może prowadzić do rozdzielenia przepływu, powodując duży wzrost strat ciśnienia [12–14]. Charakterystyka przepływów cieczy nieściśliwych w kolanach nie została jeszcze w pełni opisana [1].

Autorzy pracy [8] przedstawili symulację numeryczną zależności liczby Reynoldsa od punktu rozdziału przepływu turbulentnego w kolanie wygiętym pod kątem 90° . Badania obejmowały przepływ wody ($\rho=990,2 \text{ kg/m}^3$, $\mu=0,0006 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$, $T=300 \text{ K}$) przez kolana o wewnętrznej średnicy równej $0,01 \text{ m}$ i $R/D=1$, w zakresie liczby Reynoldsa od $1\cdot 10^3$ do $10\cdot 10^5$. Rysunek 1 przedstawia złożoną strukturę przepływu turbulentnego w kolanie wygiętym pod kątem 90° . Badacze zaobserwowali bardzo skomplikowaną strukturę przepływu, jaka tworzyła się za wylotem łuku z powodu fluktuacji wywołanej przez obszar rozdziału strumienia i wzrost prędkości przepływu wody. Autorzy podali, że za wylotem łuku w pobliżu wewnętrznej ścianki



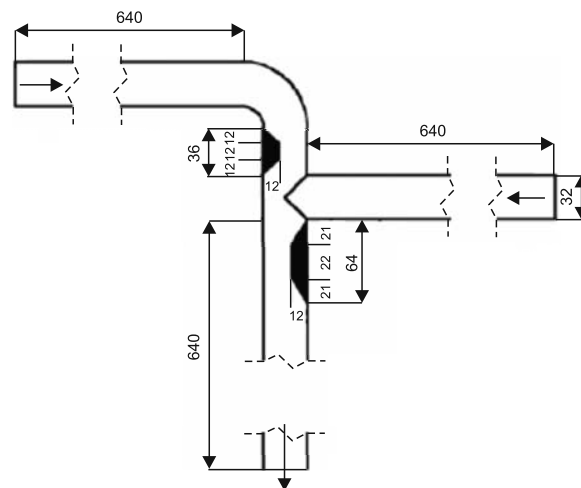
Rys. 1. Złożona struktura przepływu cieczy w kolanie rury [8]
Fig. 1. Complex flow structure in the pipe elbow [8]

łuku, znajdował się obszar o małej prędkości, w którym występował punkt rozdziału przepływu wody. W trakcie badań we wszystkich kolanach wyodrębniono obszar z punktem rozdziału przepływu i stwierdzono wyraźną zależność liczby Reynoldsa od punktu rozdziału przepływu. Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa punkt rozdziału przepływu wody przybliżał się do łuku, a punkt ponownego połączenia przepływu oddalał się od niego. Na wylocie łuku badacze zaobserwowali dwa obracające się w przeciwnym kierunku wiry Deana (rys. 1). Przepływ wody w obszarze o małej prędkości był bardzo złożony i niestabilny ze względu na występowanie punktu rozdziału, który powodował, że strumień na wylocie łuku przemieszczał się w trzech kierunkach. Badacze podczas symulacji numerycznych nie określili strat hydraulicznych, jakie występowały podczas przepływu wody przez badane kolano, ani nie określili wartości współczynnika oporów miejscowych.

Z kolei autorzy pracy [15] przedstawili wyniki badań strat hydraulicznych i współczynnika oporów miejscowych w kolanach wygiętych pod kątem 90° oraz dyfuzorach stożkowych i zwężkach uskokowych. Zakres badań obejmował kolana o średnicy 25 mm, 40 mm oraz 50 mm i stosunku R/D równym 1,5, 2,0, 4,0 oraz 6,0, a ponadto dyfuzory stożkowe o średnicy wlotu $D_1=50$ mm i wylotu $D_2=25$ mm i kącie zwichnięcia stożka (θ) równym 3° , 5° , 10° , 20° i 90° , a także dwie zwężki uskokowe, których średnice wlotu i wylotu wynosiły $\beta_1=D_1/D_2=50/25$ mm oraz $\beta_2=D_1/D_2=68/25$ mm. Badania wykonano z użyciem cieczy nienewtonowskiej, którą była mieszanina węglowo-wodna o stężeniu masowym $57\pm 62\%$. Autorzy ci udowodnili, że podczas przepływu zawiesiny węglowo-wodnej o danym stężeniu masowym przez badane kształtki, ich parametry, czyli R/D , θ oraz β miały niewielki wpływ na wartości współczynnika oporów miejscowych. Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa do 1000 i stężenia masowego zawiesiny węglowo-wodnej wartości współczynnika oporów miejscowych badanych kształtek malały, natomiast przy większych wartościach ($Re > 1000$) wykazywały różne zachowania (tendencje) ze względu na szczególne reologiczne właściwości zawiesiny węglowo-wodnej, w której wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa rosną naprężenia ścinające.

Inni autorzy w artykule [16] przedstawili wyniki badań zmniejszenia oporu hydraulicznego w połączonych kolanach i trójnikach przez zastosowanie klinowych elementów

po wewnętrznej stronie ścianki za wylotem z łuku (rys. 2), w celu zmiany struktury przepływu strumienia cieczy i stłumienia powstających w tym obszarze wirów Deana, które zwiększają opór hydrauliczny. Autorzy badali efekt zmniejszenia oporu hydraulicznego w połączonych kolanach i trójnikach za pomocą metod eksperymentalnych i numerycznych, wyznaczając wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ) połączonych kształtek. Uzyskane wyniki pokazały, że zastosowane elementy w kształcie klina o odpowiedniej wysokości rzeczywiście zmniejszały ich opór hydrauliczny. Badacze ci wykazali, że w połączonych kolanach i trójnikach wysokość elementów w kształcie klina zmniejszającego opór hydrauliczny nie powinna przekraczać $1/4$ średnicy wewnętrznej przewodu.



Rys. 2. Układ kolana i trójnika z klinami [16]
Fig. 2. The system of elbow and tee with wedges [16]

Do obliczeń hydraulicznych instalacji wodociągowej lub centralnego ogrzewania niezbędna jest znajomość wartości liczbowej współczynnika oporów miejscowych (ζ), którą można wyznaczyć z normy PN-76/M-34034 [17] lub danych literaturowych [4, 18–26]. Jednakże wyniki badań [4, 20, 21] wskazują, że przy wyznaczaniu wartości współczynnika oporów miejscowych kształtek nie korzysta się z normy [17], ponieważ uzyskane rezultaty są znacznie niższe od rzeczywistych wartości pomierzonych.

W zależności od tego, z jakich źródeł literatury korzysta się przy dobieraniu wartości współczynnika oporów miejscowych kształtek do obliczania strat hydraulicznych w rurociągach wodociągowych lub centralnego ogrzewania, otrzymuje się różne wyniki. Na wzrost oporów hydraulicznych danej kształtki ma wpływ szorstkość jej wewnętrznej ścianki, kąt wygięcia, wielkość średnicy oraz sposób łączenia z rurociągiem. W związku z tym instalacje wodociągowe i centralnego ogrzewania, w których występują duże opory hydrauliczne charakteryzują się większymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi, ponieważ wymagają pomp o większej wysokości podnoszenia, które muszą być wyposażone w silniki o większej mocy.

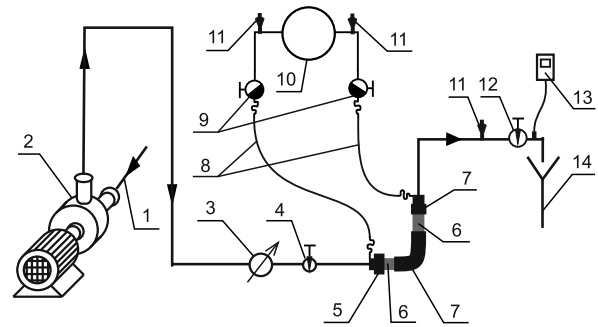
W niniejszym artykule przedstawiono analizę porównawczą wyników badań wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ) obliczonych według normy PN-76/M-34034 [17] i wyznaczonych doświadczalnie na stanowisku pomiarowym. Przedmiotem badań były zgrzewane kolana z polipropylenu (PP) o kącie nachylenia 90° i średnicy 0,02 m, które były prawidłowo zgrzane i dociśnięte (równocześnie), zbyt słabo zgrzane i dociśnięte lub zbyt mocno zgrzane i dociśnięte.

Stanowisko pomiarowe i metody badań

Do badań oporu hydraulicznego zgrzewanych kolan z polipropylenu, w celu wyznaczenia rzeczywistych wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ), zbudowano laboratoryjne stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 3. Rurociągiem (1) doprowadzano wodę do pompy (2), która wymuszała jej przepływ przez stanowisko pomiarowe. Za pompą zamontowano elektromagnetyczny przepływomierz (3) typu PROMAG 33FT40 (Endress+Hauser, zakres $0,0 \div 106 \text{ dm}^3/\text{min}$) do pomiaru ilości przepływającej wody, a także zawór iglicowy (4), który odcinał dopływ wody podczas wymiany kolana. Na początku i na końcu kolana (7) zamontowano wężyki impulsowe (8), które podłączono do zaworów kulowych (9). Opory hydrauliczne poszczególnych kolan określano za pomocą piezoelektrycznego miernika różnicy ciśnień (10) typu DELTABAR 230 (Endress+Hauser, zakres $0,0 \div 500 \text{ mbar}$). Kolana na stanowisku pomiarowym montowano w pozycji poziomej za pomocą śrubunku (5) i krótkiego odcinka rury z PP (6). W najwyższych punktach układu pomiarowego zamontowano odpowietrzniki (11). Wartość strumienia objętości wody regulowano zaworem iglicowym (12), za którym zamontowano elektroniczny termometr oporowy (13) do pomiaru temperatury wody. Stanowisko pracowało w układzie otwartym, a woda opuszczająca układ była odprowadzana do kanalizacji (14). Błąd pomiaru przepływomierza elektromagnetycznego i piezoelektrycznego miernika różnicy ciśnień był mniejszy od 1%, a wyjściowy sygnał prądowy miał zakres $4 \div 20 \text{ mA}$. Dokładność pomiarowa elektronicznego termometru oporowego wynosiła $\pm 1^\circ\text{C}$, a rozdzielczość pomiaru $0,1^\circ\text{C}$.

Badania oporu hydraulicznego zgrzewanych kolan z PP podzielono na dwa etapy – w pierwszym obliczono wartości współczynnika oporów miejscowych według normy PN-76/M-34034 [17], przyjmując wartość współczynnika chropowatości bezwzględnej $k=0,007 \text{ mm}$ [20], natomiast w drugim wyznaczono wartości tego współczynnika na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Pomiaru oporu hydraulicznego poszczególnych kolan zostały wykonane w następujący sposób: po zamontowaniu poziomo danego kolana (7) i otwarciu zaworów (4) i (12) włączono pompę (2) i otwarto zawory (9) na rozdzielaczu piezoelektrycznego miernika różnicy ciśnień (10), który za pomocą wężyków impulsowych (8) połączony był z początkiem i końcem badanego kolana. Następnie odpowietrzono wężyki impulsowe (8) i miernik piezoelektryczny (10) oraz cały układ pomiarowy za pomocą odpowietrzników (11). Po usunięciu pęcherzyków powietrza z układu pomiarowego ustawiono na elektromagnetycznym przepływomierzu (3) za pomocą zaworu iglicowego (12) pierwszą zadaną wartość strumienia objętości wody (q). Po ustabilizowaniu się warunków przepływu wody wykonano odczyty różnicy ciśnień (Δp) z miernika piezoelektrycznego (10) oraz temperatury wody (T) z elektronicznego termometru oporowego (13). Następnie zaworem iglicowym (12) ustawiono kolejną wartość strumienia objętości wody i po ustabilizowaniu się warunków przepływu wykonano kolejne odczyty Δp oraz T . Po zakończeniu każdej serii pomiarowej wyłączano pompę (2).

W czasie pomiaru oporu hydraulicznego kolan występowały również opory hydrauliczne na krótkich odcinkach rur z PP i śrubunkach łączących badane kolana z końcówkami impulsowymi. W związku z tym dodatkowo wykonano



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego do badania oporu hydraulicznego kolan z polipropylenu (1 – rurociąg doprowadzający wodę, 2 – pompa, 3 – przepływomierz elektromagnetyczny, 4 – zawór iglicowy, 5 – śrubunki, 6 – odcinki rur z PP, 7 – kolano, 8 – wężyki impulsowe, 9 – odcinające zawory kulowe, 10 – piezoelektryczny miernik różnicy ciśnień, 11 – odpowietrzniki, 12 – zawór iglicowy do regulacji przepływu wody, 13 – elektroniczny termometr oporowy, 14 – spust do kanalizacji)

Fig. 3. Schematic diagram of the measurement stand for investigations of hydraulic resistance in PP elbows (1 – water supply pipeline, 2 – pump, 3 – electromagnetic water flow meter, 4 – needle valve, 5 – hydraulic screw union, 6 – PP pipe sections, 7 – elbow, 8 – impulse hoses, 9 – cut-off ball valves, 10 – piezoelectric meter of the pressure difference, 11 – breathers, 12 – water flow steering needle valve, 13 – electronic resistance thermometer, 14 – drain to sewage)

pomiary oporu hydraulicznego śrubunków wraz z zamontowanym między nimi odcinkiem rury, który stanowił sumę odcinków rur wykorzystanych do badań danego kolana. Otrzymane wartości oporu hydraulicznego rur i śrubunków odjęto od pomierzonego oporu hydraulicznego kolana, uzyskując w ten sposób rzeczywisty opór hydrauliczny, jaki występował w badanym kolanie.

Pomiary oporu hydraulicznego wykonano przy zadanych wartościach strumienia objętości wody (q) z zakresu $5 \div 25 \text{ dm}^3/\text{min}$, co $1 \text{ dm}^3/\text{min}$. Badania wykonano z użyciem 30 losowo zgrzanych kolan z PP (średnica $0,02 \text{ m}$, kąt nachylenia 90°) i trzech sposobach ich zgrzania. W każdej grupie było 10 kolan (rys. 4) – pierwszą grupę stanowiły kolana prawidłowo zgrzane i prawidłowo dociśnięte, drugą kolana zbyt słabo zgrzane i zbyt słabo dociśnięte, a trzecią kolana zbyt mocno zgrzane i zbyt mocno dociśnięte.

Podczas pomiarów na przepływomierzu elektromagnetycznym obserwowano minimalne pulsacje przepływu wody (q) wywołane pracą pompy, które wpływały również na wartości różnicy ciśnień (Δp) rejestrowane przez miernik piezoelektryczny (10). W celu wyeliminowania przypadkowych błędów pomiarowych, w przypadku każdego kolana wykonano trzy serie pomiarowe, a wyniki uśredniono. W ten sposób w każdej grupie kolan uzyskano 10 uśrednionych serii pomiarowych.

Wartości współczynnika oporów miejscowych zgrzewanych kolan z polipropylenu wyznaczono na podstawie badań eksperymentalnych wykorzystując równania [27]:

$$\zeta = 2\Delta p / (\rho V^2) \quad (1)$$

$$V = q10^6 / (\pi d^2 / 4) \quad (2)$$

w których:

ζ – współczynnik oporów miejscowych

q – strumień objętości wody, m^3/s

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2

Δp – różnica ciśnień, Pa

V – prędkość przepływu wody, m/s

ρ – gęstość wody, kg/m^3

d – średnica wewnętrzna kolana, mm



Kolano prawidłowo zgrzane i dociśnięte

Kolano zbyt słabo zgrzane i dociśnięte

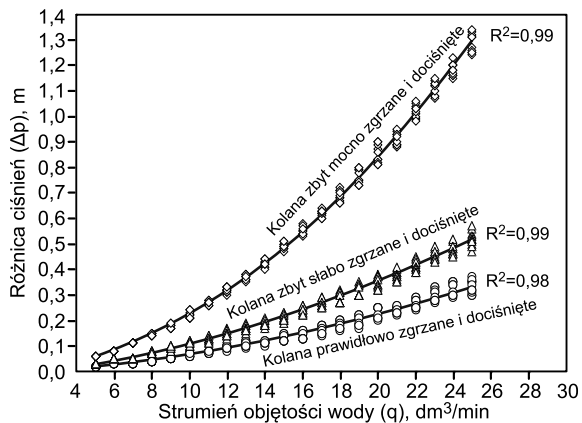
Kolano zbyt mocno zgrzane i dociśnięte

Rys. 4. Trzy rodzaje kolan z polipropylenu z widocznymi wypływkami powstałymi podczas dociskania zgrzewanych elementów
 Fig. 4. Three types of polypropylene elbows with the flashes formed while pressing the welded elements

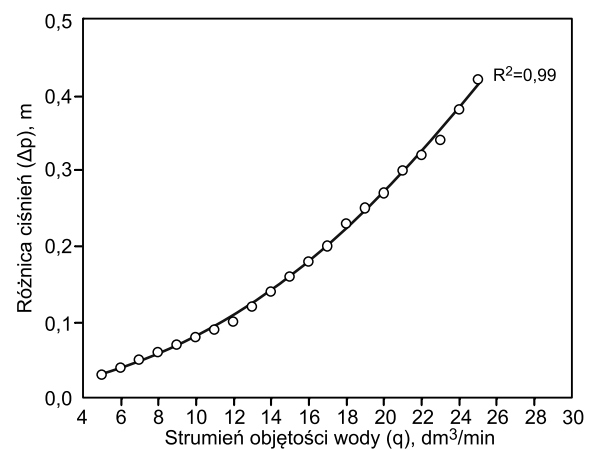
Dyskusja wyników badań

Analizując wygląd poszczególnych kolan (rys. 4) widać wyraźnie, że sposób ich zgrzania i dociśnięcia będzie miał wpływ na miejscowe opory hydrauliczne, jakie będą występowały podczas przepływu strumienia wody. W przypadku kolana prawidłowo zgrzanego i prawidłowo dociśniętego, w jego wnętrzu po obu stronach wytworzyły się po dwie przylegające do siebie małe wypływki, które powstały w trakcie dociskania kolana. W przypadku kolana zbyt słabo zgrzanego i zbyt słabo dociśniętego również powstały po dwie małe wypływki, które nie przylegały do siebie, lecz były oddalone. Z kolei w przypadku kolana zbyt mocno zgrzanego i za mocno dociśniętego powstały pojedyncze duże wypływki, które wyraźnie kryżowały pole przekroju kolana z obu stron.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów rzeczywistej różnicy ciśnień (Δp), czyli oporu hydraulicznego kolana po odjęciu oporów występujących w śrubunkach z zamontowanym między nimi odcinkiem rury, który stanowił sumę odcinków rur wykorzystanych do badań danego kolana (rys. 6). Podczas pomiarów opór hydrauliczny w kolanach wzrastał wraz ze wzrostem wartości strumienia wody (rys. 5) i była to tendencja zgodna z danymi literaturowymi [4, 18, 20–26]. Najmniejszy opór hydrauliczny podczas przepływu wody występował w przypadku kolan prawidłowo zgrzanych i prawidłowo dociśniętych, a największy w kolanach zbyt mocno zgrzanych i za mocno



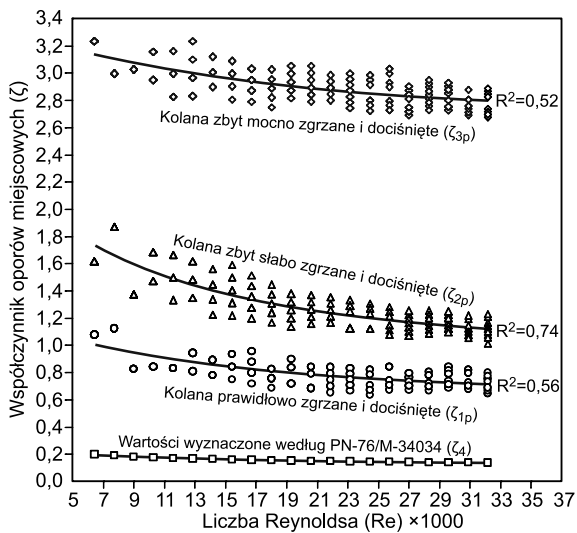
Rys. 5. Zależność rzeczywistej różnicy ciśnień (Δp) w kolanach z PP o średnicy DN20 od strumienia objętości wody (q)
 Fig. 5. Correlation between real pressure difference (Δp) and water flow rate (q) in DN20 PP elbows



Rys. 6. Zależność średniej różnicy ciśnień (Δp) w śrubunkach i odcinkach rur z PP od strumienia objętości wody (q)
 Fig. 6. Correlation between average pressure difference (Δp) and water flow rate (q) in hydraulic screw unions and PP pipe sections

dociśniętych. Typ trendu (regresji) pomierzonych wartości Δp był potęgowy, a wartości współczynnika determinacji z próby (R^2) były powyżej 0,98, co wskazuje, że opór hydrauliczny zgrzewanych kolan w co najmniej 98% zależał od przepływu wody i dokładności wykonania połączenia kolana, a tylko w 2% od pozostałych czynników, takich jak temperatura wody czy przyspieszenie ziemskie.

Wykorzystując równania (1) i (2), przy zadanych wartościach strumienia objętości wody (q) i pomierzonych rzeczywistych wartościach różnicy ciśnień (Δp) w poszczególnych kolanach (rys. 5), wyznaczono wartości współczynnika oporów miejscowych ($\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$), które porównano z wartościami współczynnika oporów miejscowych (ζ_4), obliczonymi według normy PN-76/M-34034. Wartości współczynnika oporów miejscowych badanych kolan malały wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa (rys. 7) i była to tendencja prawidłowa, zgodna z danymi literaturowymi [4, 20–26]. Najmniejsze wartości współczynnika oporów miejscowych występowały w przypadku kolan prawidłowo zgrzanych i prawidłowo dociśniętych, a największe w przypadku kolan zbyt mocno zgrzanych i za mocno dociśniętych. Typ trendu (regresji) wyznaczonych wartości ζ był potęgowy, a wartości współczynnika determinacji z próby (R^2) były powyżej 0,52, co wskazuje, że współczynnik oporów miejscowych w co najmniej 52% zależał do liczby Reynoldsa, czyli prędkości przepływu wody



Rys. 7. Zależność współczynnika oporów miejscowych (ζ) kolan z PP o średnicy DN20 od liczby Reynoldsa (Re)

Fig. 7. Correlation between local resistance coefficients (ζ) and the Reynolds number (Re) for DN20 PP elbows

(V), średnicy kolana (d) i kinematycznego współczynnika lepkości wody (ν) oraz dokładności wykonania połączenia kolana, a w 48% od różnicy ciśnień (Δp), jaka występuje w kolanie podczas przepływu strumienia wody.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe statystyki wartości współczynnika oporów miejscowych wyznaczonych z pomiarów i obliczonych według normy PN-76/M-34034. Średnia wartość współczynnika oporów miejscowych z pomiarów dotyczących kolan prawidłowo zgrzanych i prawidłowo dociśniętych wyniosła $\zeta_{1p}=0,806$, kolan zbyt słabo zgrzanych i zbyt słabo dociśniętych – $\zeta_{2p}=1,341$, a kolan zbyt mocno zgrzanych i za mocno dociśniętych – $\zeta_{3p}=2,941$, natomiast jego wartość obliczona według normy PN-76/M-34034 wyniosła tylko $\zeta_4=0,157$.

Tabela 1. Podstawowe statystyki wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ)

Table 1. Basic statistics for local resistance coefficient values (ζ)

Współczynnik oporów miejscowych (ζ)	Statystyka				
	minimum	maksimum	średnia	mediana	odchylenie standardowe
ζ_{1p}^*	0,635	1,123	0,806	0,811	0,112
ζ_{2p}^*	1,013	1,872	1,341	1,276	0,187
ζ_{3p}^*	2,674	3,234	2,941	2,912	0,100
ζ_4^{**}	0,137	0,198	0,157	0,152	0,018

*wartości wyznaczone z pomiarów

**wartości obliczone wg PN-76/M-34034

Zależność funkcyjną wyznaczonych z pomiarów wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ) badanych kolan (rys. 7) od liczby Reynoldsa (Re) najlepiej opisywał potęgowy model matematyczny w postaci równań:

$$\zeta_{1w} = 6,69(Re)^{-0,22} \quad (3)$$

$$\zeta_{2w} = 19,08(Re)^{-0,27} \quad (4)$$

$$\zeta_{3w} = 5,87(Re)^{-0,07} \quad (5)$$

w których:

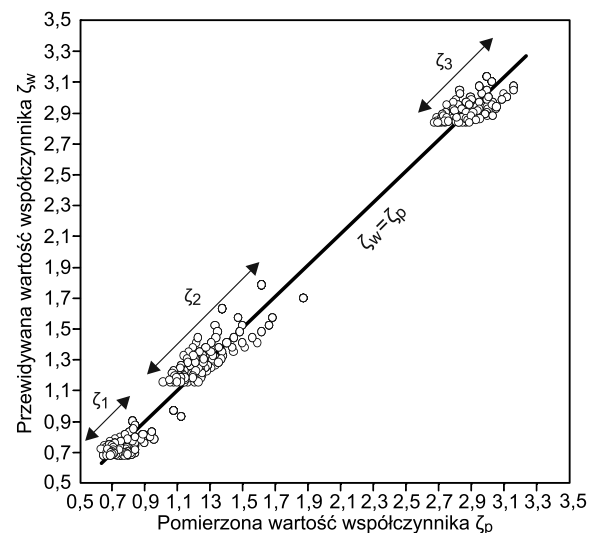
ζ_{1w} – współczynnik oporów miejscowych w przypadku kolan prawidłowo zgrzanych i prawidłowo dociśniętych

ζ_{2w} – współczynnik oporów miejscowych w przypadku kolan zbyt słabo zgrzanych i za mało dociśniętych

ζ_{3w} – współczynnik oporów miejscowych w przypadku kolan zbyt mocno zgrzanych i za mocno dociśniętych

Re – liczba Reynoldsa

Ocenę dopasowania potęgowego modelu matematycznego do obliczania wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ) w kolanach z PP wykonano wykorzystując wykres (rys. 8), na którym na osi pionowej odłożono wyniki obliczeń za pomocą równań (3)–(5), czyli wartości przewidywane (ζ_w), natomiast na osi poziomej wartości uzyskane z pomiarów (ζ_p) (rys. 7). Otrzymane punkty aproksymowano funkcją liniową przechodzącą przez początek układu współrzędnych, dlatego weryfikacją poprawności doboru modelu matematycznego był współczynnik kierunkowy funkcji liniowej. Analizując zależność pokazaną na rysunku 8 widać dobrą zgodność potęgowego modelu matematycznego, ponieważ współczynnik kierunkowy funkcji liniowej wyniósł 1.



Rys. 8. Weryfikacja prawidłowości modelu potęgowego do obliczania współczynnika oporów miejscowych (ζ) zgrzewanych kolan z PP o średnicy DN20

Fig. 8. Validation of the assumed power model to calculate local resistance coefficient (ζ) for welded DN20 PP elbows

Przy projektowaniu pionów i podejść do punktów czepalnych wykorzystuje się minimalne i maksymalne prędkości przepływu wody [28]. Jeżeli liczbę Reynoldsa zapisze się w postaci $Re=Vd/\nu$, wówczas równania (3), (4) i (5) przyjmą kolejno następującą postać:

$$\zeta_{1obl} = 6,69(Vd/\nu)^{-0,22} \quad (6)$$

$$\zeta_{2obl} = 19,08(Vd/\nu)^{-0,27} \quad (7)$$

$$\zeta_{3obl} = 5,87(Vd/\nu)^{-0,07} \quad (8)$$

w których:

V – prędkość przepływu wody, m/s

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody, m^2/s

d – średnica wewnętrzna kolana, m

Przeprowadzono również analizę statystyczną, aby sprawdzić, czy różnice średnich wartości współczynników wyznaczonych z pomiarów (ζ_{1p} , ζ_{2p} , ζ_{3p}) i obliczonych ze wzorów (ζ_{1obl} , ζ_{2obl} , ζ_{3obl}) są statystycznie istotne. W tym celu zastosowano test t-Studenta do dwóch populacji

Tabela 2. Wyniki obliczeń statystyki z testu t-Studenta (różnice wartości średnich są istotne z prawdopodobieństwem $p < 0,05$)
 Table 2. Results of calculations of the t-Student statistics (the differences between average values are significant with the probability of $p < 0,05$)

Współczynnik oporów miejscowych (ζ)	Statystyka							
	średnia	odchylenie standardowe	liczebność populacji	różnica średnich	odchylenie standardowe różnic	$ t_{obl} $	p_{obl}	$t_{\alpha=0,05}$
ζ_{1p}	0,806	0,112	21	0,022	0,052	1,976	0,062	2,021
$\zeta_{1obl(6)}$	0,783	0,084						
ζ_{2p}	1,341	0,187		-0,034	0,078	-1,986	0,060	
$\zeta_{2obl(7)}$	1,375	0,183						
ζ_{2p}	2,941	0,100		-0,021	0,053	-1,861	0,077	
$\zeta_{2obl(8)}$	2,963	0,100						

$|t_{obl}|$ – obliczona wartość testu t-Studenta

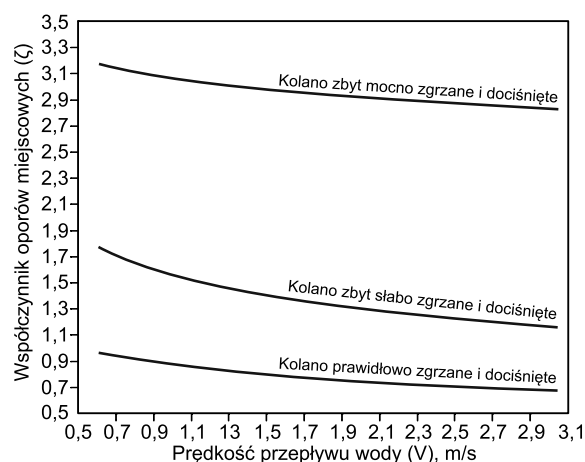
p_{obl} – obliczona wartość prawdopodobieństwa

$t_{\alpha=0,05}$ – odczytana z tablic wartość testu t-Studenta ($p=0,05$; $v=40$)

stawiając hipotezę zerową ($H_0: n_1=n_2$), że różnice wartości średnich są statystycznie równe i alternatywną ($H_1: n_1 \neq n_2$), że różnice wartości średnich są statystycznie różne. Obliczenia wartości statystyki $|t_{obl}|$ t-Studenta wykonano programem komputerowym Statistica, a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2.

Określając obszar krytyczny hipotezy alternatywnej $|t_{obl}| \geq t_{\alpha=0,05}$, z tablic rozkładu t-Studenta, przy 40 stopniach swobody ($v=n_1+n_2-2$) i poziomie istotności $\alpha=0,05$, odczytano wartość krytyczną $t_{\alpha=0,05}=2,021$. Ponieważ $|t_{obl}| \leq t_{\alpha=0,05}$ (tab. 2), zatem hipotezy zerowej nie można odrzucić, z czego wynika, że różnice między średnimi wartościami współczynnika oporów miejscowych wyznaczonymi z pomiarów (ζ_{1p} , ζ_{2p} , ζ_{3p}) i obliczonymi ze wzorów (6)–(8) (ζ_{1obl} , ζ_{2obl} , ζ_{3obl}) są nieistotne statystycznie, czyli takie same. Potwierdza to również obliczona wartość prawdopodobieństwa – p_{obl} było większe od $p < 0,05$. W związku z tym równania (6)–(8) można wykorzystać do projektowania instalacji wodociągowych wykonywanych z PP w celu wyznaczenia rzeczywistych wartości współczynnika ζ , w zależności od przyjętej dokładności wykonania połączenia kolana o średnicy DN 20. Wykorzystując te równania, opracowano do celów projektowych, zgodnie z wymaganiami normy PN-92/B-01706, nomogram do wyznaczania wartości współczynnika ζ w zależności od prędkości przepływu wody w kolanach z polipropylenu o średnicy DN 20 (rys. 9).

Analizując wyniki badań i obliczeń wykonanych według normy PN-76/M-34034 należy stwierdzić, że wartości współczynnika oporów miejscowych ζ w przypadku kształtek powinny być wyznaczane metodą pomiaru. Wielu producentów i dystrybutorów kształtek w katalogach technicznych nie podaje wartości współczynnika ζ , a jeśli tak, to nie bardzo wiadomo, czy odpowiadają one rzeczywistości, ponieważ wartości ζ kształtek z PP o tej samej średnicy, lecz różnych producentów, są odmienne. Obliczone według normy PN-76/M-34034 wartości współczynnika ζ kształtek były znacznie mniejsze od wartości pomierzonych [4, 20, 21]. Potwierdzają to również niniejsze badania, przeprowadzone z użyciem zgrzewanych kolan z PP o średnicy DN 20. Analizując problem współczynnika oporów miejscowych należy również uwzględnić opór hydrauliczny związany z połączeniem kształtki z prostoliniowym odcinkiem rurociągu. W rzeczywistości odcinki proste łączące kształtkę również są źródłem oporów hydraulicznych. W literaturze naukowo-technicznej często brakuje informacji, czy współczynnik ζ dotyczy samej kształtki



Rys. 9. Nomogram do odczytywania wartości współczynnika oporów miejscowych (ζ) zgrzewanych kolan z PP o średnicy DN 20 w zależności od prędkości przepływu wody (V)

Fig. 9. The nomogram to determine local resistance coefficients (ζ) in function of water flow velocity (V) for DN 20 PP elbows

czy również oporów powstających na prostoliniowym odcinku rurociągu łączącym kształtkę. Zgodnie z metodą wyznaczania oporów miejscowych podaną w normie [27], powinny być uwzględniane także opory hydrauliczne powstające na prostoliniowym odcinku rurociągu łączącym kształtkę. W związku z tym opory hydrauliczne, które powstają na tym odcinku rurociągu powinny być pomierzone, a nie obliczone, ponieważ dokładność tych obliczeń zależy od przyjętej lub obliczonej wartości współczynnika oporów liniowych (λ) oraz przyjętej wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej (k).

Wnioski

♦ Współczynnik oporów miejscowych (ζ) zgrzewanych kolan z polipropylenu nie ma wartości stałej i zależy od prędkości przepływu wody oraz dokładności wykonania połączenia danego kolana. W zgrzewanych kolanach z PP wzrost prędkości przepływu wody powoduje spadek wartości współczynnika ζ . Równania (6)–(8) oraz nomogram zamieszczony na rysunku 9 można wykorzystać w projektowaniu instalacji wodociągowych wykonywanych z PP, do wyznaczania rzeczywistych wartości współczynnika oporów ζ , w zależności od przyjętej dokładności wykonania połączenia kolana o średnicy DN 20.

◆ Ponieważ rzeczywista wartość współczynnika ζ zgrzewanych kolan z polipropylenu istotnie zależy od czasu zgrzewania i siły docisku łączonych elementów, dlatego niezbędne jest precyzyjne określenie przez producentów kształtek czasu zgrzewania i siły docisku oraz wyposażenie zestawów do zgrzewania kształtek w dynamometry do pomiaru siły docisku podczas łączenia zgrzewanych kształtek.

◆ Metody obliczania wartości współczynnika oporów miejscowych, zawarte w normie PN-76/M-34034, bardzo zaniżają otrzymane wyniki, w porównaniu z wartościami wyznaczonymi z pomiarów w przypadku zgrzewanych kolan z polipropylenu. Znaczna różnica wartości współczynnika ζ wyznaczonych z pomiarów w porównaniu z wartościami obliczonymi według normy tej wskazuje, że należy uściślić zalecane metody obliczania wartości współczynnika oporów miejscowych w przypadku kształtek.

◆ Wartości współczynnika oporów miejscowych zgrzewanych kolan z polipropylenu podawane w literaturze i katalogach znacznie odbiegają od wartości rzeczywistych wyznaczonych w pomiarach. W związku z tym niezbędne są dalsze badania zgrzewanych kształtek z polipropylenu w całym zakresie produkowanych średnic, które pozwolą na wyznaczenie rzeczywistych wartości współczynnika ζ i umożliwią opracowanie nowej normy do wyznaczania wartości współczynnika oporów miejscowych.

LITERATURA

1. A. ONO, N. KIMURA, H. KAMIDE, A. TOBITA: Influence of elbow curvature on flow structure at elbow outlet under high Reynolds number condition. *Nuclear Engineering and Design* 2011, Vol. 241, No. 11, pp. 4409–4419.
2. R. LUO, J. XIA, J. SOBOTA: Prędkość krytyczna przejścia ruchu laminarnego w turbulentny na przykładzie przepływu mieszaniny węglowo-wodnej w rurociągach (Critical velocity of transition from laminar to turbulent flow in the example of coal-water mixture in pipelines). *Ochrona Środowiska* 2018, vol. 40, nr 1, ss. 51–55.
3. P. CSIZMADIA, C. HÓS: CFD-based estimation and experiments on the loss coefficient for Bingham and power-law fluids through diffusers and elbows. *Computers & Fluids* 2014, Vol. 99, pp. 116–123.
4. N.K. GIETKA: Doświadczalna analiza współczynników oporów lokalnych na kolankach w systemach przewodów wielowarstwowych. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus* 2015, t. 14, nr 1, ss. 47–56.
5. A. LI, X. CHEN, L. CHEN, R. GAO: Study on local drag reduction effects of wedge-shaped components in elbow and T-junction close-coupled pipes. *Building Simulation* 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 175–184.
6. I. CISOWSKA: Studies of hydraulic resistance in polypropylene pipe fittings. *Structure & Environment* 2009, Vol. 1, No. 1, pp. 53–58.
7. R. RÖHRIG, S. JAKIRLIĆ, C. TROPEA: Comparative computational study of turbulent flow in a 90° pipe elbow. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2015, Vol. 55, pp. 120–131.
8. P. DUTTA, S.K. SAHA, N. NANDI, N. PAL: Numerical study on flow separation in 90° pipe bend under high Reynolds number by k- ϵ modelling. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2016, Vol. 19, pp. 904–910.
9. R. R. CHOWDHURY, M. M. ALAM, A. K. M. SADRUL ISLAM: Numerical modeling of turbulent flow through bend pipes. *Mechanical Engineering Research Journal* 2016, Vol. 10, pp. 14–19.
10. P. DUTTA, N. NANDI: Effect of Reynolds number and curvature ratio on single phase turbulent flow in pipe bends. *Mechanics and Mechanical Engineering* 2015, Vol. 19, No. 1, pp. 5–16.
11. M. KALENIK: Empirical formulas for calculation of negative pressure difference in vacuum pipelines. *Water* 2015, Vol. 7, No. 10, pp. 5284–5304.
12. L. H. O. HELLSTRÖM, A. SINHA, A. J. SMITS: Visualizing the very-large-scale motions in turbulent pipe flow. *Physics of Fluids* 2011, Vol. 23, No. 1, 011703.
13. H. TAKAMURA, S. EBARA, H. HASHIZUME, K. AIZAWA, H. YAMANO: Flow visualization and frequency characteristics of velocity fluctuations of complex turbulent flow in a short elbow piping under high Reynolds number condition. *Journal of Fluids Engineering* 2012, Vol. 134, No. 10, pp. 101201–101209.
14. J. KIM, M. YADAV, S. KIM: Characteristics of secondary flow induced by 90-degree elbow in turbulent pipe flow. *Engineering Applications Computational Fluid Mechanics* 2014, Vol. 8, No. 2, pp. 229–239.
15. M. LIU, Y.F. DUAN: Resistance properties of coal-water slurry flowing through local piping fittings. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2009, Vol. 33, No. 5, pp. 828–837.
16. A. LI, X. CHEN, L. CHEN, R. GAO: Study on local drag reduction effects of wedge-shaped components in elbow and T-junction close-coupled pipes. *Building Simulation* 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 175–184.
17. PN-76/M-34034: Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia. Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa, Warszawa 1987.
18. I. CISOWSKA, A. KOTOWSKI: Straty ciśnienia w układach kształtek z polipropylenu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2004, nr 10, ss. 340–345.
19. A. KOTOWSKI, P. WÓJTOWICZ: Podstawy metodologiczne badań parametrów hydraulicznych ciśnieniowych rurociągów i kanałów z tworzyw sztucznych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2005, nr 1, ss. 18–24.
20. M. KALENIK, B. WITOWSKA: Eksperymentalne badania miejscowych oporów hydraulicznych w kształtkach żeliwnych. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura* 2006, nr 5(2), ss. 31–43.
21. M. KALENIK, B. WITOWSKA: Badania miejscowych oporów hydraulicznych w kształtkach PVC. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura* 2007, nr 6(3), ss. 15–24.
22. D. BRYDAK-JEŻOWIECKA, E. NOWAKOWSKI, P. MALINOWSKI: Straty ciśnienia w rurach z tworzyw sztucznych stosowanych w instalacjach wodociągowych. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 1994, nr 7, ss. 208–211.
23. E. NOWAKOWSKI: Opory miejscowe w instalacjach wodociągowych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 1995, nr 2, ss. 79–83.
24. K. STRZELECKA, K. JEŻOWIECKA-KABSCH: Rzeczywiste wartości współczynnika oporów miejscowych podczas przepływu wody przez skokowe rozszerzenie rury (Real values of resistance coefficients in water flow through leading pipe sudden expansion). *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 2, ss. 29–33.
25. Y. LI, C. WANG, M. HA: Experimental determination of local resistance coefficient of sudden expansion tube. *Energy and Power Engineering* 2015, Vol. 7, No. 4, pp. 154–159.
26. O. PLIŻGA, B. KOWALSKA, A. MUSZ-POMORSKA: Laboratory and numerical studies of water flow through selected fittings installed at copper pipelines. *Rocznik Ochrona Środowiska* 2016, t. 18, cz. 2, ss. 873–884.
27. PN-EN 1267: Armatura przemysłowa. Badania oporu przepływu wodą. PKN, Warszawa 2012.
28. PN-92/B-01706: Instalacje wodociągowe. Wymagania w projektowaniu. Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa, Warszawa 1992.

Kalenik, M. Real Values of Local Resistance Coefficient during Flow of Water through Welded Polypropylene Elbows. *Ochrona Srodowiska* 2019, Vol. 41, No. 1, pp. 23–30.

Abstract: The paper presents the results of investigations of local resistance coefficients (ζ) in welded polypropylene (PP) elbows of 0.02 m in diameter, angled at 90°. The investigations were performed on the purpose-built laboratory measurement stand. The scope of the research encompassed the elbows which were: properly warmed up and properly pressed (welded at the proper temperature and pressed with proper force onto the pipe); insufficiently warmed up and insufficiently pressed (welded at too low temperature and pressed with too low force onto the pipe); excessively warmed up and excessively pressed (welded at too high temperature and pressed with too high force onto the pipe). The local resistance coefficients ζ determined in measurements according to the PN-EN 1267 standard were compared to those calculated in accordance with the PN-76/M-34034 standard. The average value of the local resistance coefficient ζ , determined in measurements for properly welded and properly pressed elbows, was $\zeta_{1p}=0.806$, for insufficiently warmed up and insufficiently pressed elbows

– $\zeta_{2p}=1.341$ and for excessively warmed up and excessively pressed elbows – $\zeta_{3p}=2.941$, whereas only $\zeta_4=0.157$ was obtained from calculations according to PN-76/M-34034 standard. It was demonstrated that the local resistance coefficient values calculated for the welded PP elbows as per the PN-76/M-34034 standard were underestimated when compared with the ones experimentally measured. Based on these values, the formulas for the project purposes and in accordance with the PN-92/B-01706 standard were proposed to develop a nomogram for local resistance coefficient ζ determination in function of water flow velocity in DN20 PP elbows. The results justified a need to develop precise calculation techniques and a new standard for local resistance coefficient determinations. As the real value of local resistance coefficients ζ in welded polypropylene elbows strongly depends on the welding time and pressing force, it is necessary for pipe fittings manufacturers to precisely determine the welding time and pressing forces as well as to equip the welding sets with dynamometers to measure the pressing force during the welding process.

Keywords: Water flow, local resistance coefficient, welded polypropylene (PP) elbow, pressure difference, water supply.