

# Eksperymentalne wyznaczenie współczynników miejscowych strat ciśnienia w kolanach instalacyjnych 90° wybranego systemu wielowarstwowego

Experimental determination of minor loss coefficient of 90° elbow in multi layer composite drinking water installation

PAWEŁ GRAJPER

DOI 10.36119/15.2021.12.3

Poprawne zaprojektowanie instalacji wodociągowej wymaga prawidłowego wyznaczenia wartości strat hydraulicznych na wszystkich jej elementach. W instalacjach tych najczęściej stosowanymi kształtkami są kolana, dlatego bardzo istotna jest znajomość rzeczywistej wartości ich współczynnika strat miejscowych  $\zeta$ . W pracy przedstawiono metodykę oraz wyniki eksperymentalnego wyznaczania współczynnika strat miejscowych  $\zeta$  kolan wybranego systemu APEX, stosowanych w instalacjach wodociągowych.

*Słowa kluczowe:* instalacja wodociągowa, kolano 90°, współczynnik strat miejscowych  $\zeta$ ,

Proper design of the drinking water installation requires proper assessment the head loss in all of its elements. The most common fittings used in plumbing are elbows, therefore, it is essential to know the actual value of the minor loss coefficient  $\zeta$ . The paper presents the methodology and results of experimental determination of the minor loss coefficient of 90° elbow made of exemplary APEX drinking water installation.

*Keywords:* drinking water installation, 90° elbow, minor loss coefficient  $\zeta$ ,

## Wprowadzenie

Systemy instalacyjne z rur wielowarstwowych na bazie polietylenu usieciowanego potocznie nazywane systemami APEX łączone są technologią zaprasowywania. Polega ona na zaprasowaniu rury, wzmocnionej lub nie pierścieniem, na osadzonym w niej króćcu kształtki. Króciec wyposażony jest w uszczelnienie typu o-ring zapewniające szczelność połączenia. Umieszczenie kształtki w rurze wywołuje nagłe przewężenie przekroju. Należy się spodziewać, że będzie to miało istotny wpływ na wzrost wartości współczynników oporów kształtek. Spośród wszystkich kształtek w instalacjach wodociągowych najczęściej występują kolana. Należy nadmienić, że system APEX umożliwia alternatywną realizację zmiany kierunku poprzez wykonanie łuku giętego. Stosowanie łuków formowanych przy pomocy giętarek lub sprężyn znacznie obniża koszty montażu instalacji a przy okazji redukuje liczbę połączeń i opory miejscowe. Pomimo możliwości

zmniejszenia liczby kolan na zmianach kierunku nie sposób realizować instalacji bez ich użycia. Prawidłowe wyznaczenie wartości oporów miejscowych w kolanach wiąże się z przyjęciem poprawnej wartości współczynników strat miejscowych  $\zeta$  tych kształtek. W tym miejscu należy przypomnieć, że norma [6] podaje dla kolan (niezależnie od materiału i metody połączeń) wartość współczynnika strat miejscowych  $\zeta=0,7$ . Wartości współczynników zawarte w instrukcjach projektowania producentów systemów wykazują z kolei rozbieżności i wahają się od 0,5 do 3,45. Wobec powyższego uzasadnio-

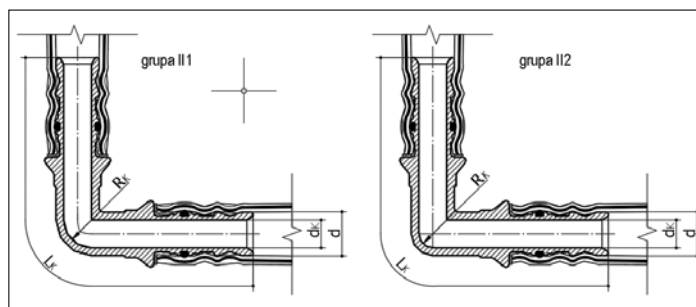
ne jest wyznaczenie wartości współczynników strat ciśnienia dla kolan na drodze badań eksperymentalnych.

Niniejszy artykuł stanowi kontynuację tematyki podjętej w [3,4] i jednocześnie prezentuje wyniki badań współczynników oporów miejscowych kolan kolejnego systemu instalacyjnego.

## Przedmiot badań

Badania przeprowadzono dla równoprzelotowych 90° kolan o średnicach DN 12, 15, 20. Analizowane, wkładane do rury, kolana z punktu widzenia klasyfikacji

Rys. 1. Parametry geometryczne kolan 90° systemów APEX



dr inż. Paweł Grajper, <https://orcid.org//0000-0001-7048-3034>; Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Inżynierii Wody i Ścieków, Politechnika Śląska, Gliwice. Adres do korespondencji/ Corresponding author: e-mail: pawel.grajper@polsl.pl

[2] należą do dwóch grup. Kolana DN12 i DN15 są kolanami o zakrzywieniu w formie kombinacji powierzchni walca i sfery (grupa II2), natomiast kolano DN20 posiada zakrzywienie w formie kombinacji powierzchni walca i torusa (grupa III1) (rys.1).

Ze względu na niedostępność dokładnych wymiarów geometrycznych analizowanych kształtek, wymiary charakterystyczne określono na podstawie pomiarów suwmiarką warsztatową GOCT 166-80  $\pm 0,1$  mm oraz śrubą mikrometryczną VIS  $\pm 0,01$  mm. Średnice wewnętrzne określano jako średnią z 15 pomiarów śrubą mikrometryczną typu VIS ( $\pm 0,01$  mm) i zestawiono w tab.1.

**Tabela 1** Zestawienie wielkości wymiarowych opisujących geometrię analizowanych kolan

Średnica nominalna DN [mm]	Średnica wewnętrzna d [mm]	Stosunek wielkości wymiarowych [-]		
		$R_K/d$	$d_K/d$	$l_K/d$
12	11,45	0,32	0,65	8,70
15	14,86	0,36	0,72	7,44
20	19,74	0,70	0,70	4,67

## Stanowisko badawcze i metodyka badań

Stanowisko badawcze oraz metodykę badań szczegółowo opisano w [2,3]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat stanowiska, natomiast na rysunku 3 fotografii stanowiska z układem kolan DN20.

Eksperymentalne wyznaczenie współczynników miejscowych strat ciśnienia związane było każdorazowo (dla analizowanej średnicy nominalnej) z pomiarem objętościowego natężenia przepływu  $Q$  i odpowiadającej mu różnicy ciśnienia w układzie kolan  $\Delta P_2$  oraz w odcinku prostym  $\Delta P_1$ . Na podstawie uzyskanych zależności strat ciśnienia od przepływu  $\Delta P_1$  w odcinku prostym o długości  $L_1$  wyznaczono zależność strat ciśnienia  $\Delta P_{L2}$  na długości  $L_2=270d$  odpowiadającej sumarycznej długości odcinków prostych występujących w układzie czterech kolan. Następnie określono straty ciśnienia na pojedynczym kolanie  $\Delta P_K$

$$\Delta P_K = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_{L2}}{4} \quad [\text{kPa}] \quad (1)$$

Na podstawie wartości uzyskanych z powyższej zależności wyznaczono wartości współczynnika oporów miejscowych  $\zeta$  zgodnie ze wzorem (2) otrzymanym w wyniku przekształcenia wzoru Weisbacha:

$$\zeta = \frac{\Delta P_K \pi^2 d^4}{8Q^2 \rho} \quad [-] \quad (2)$$

Do opisu matematycznego zastosowano analizę wymiarową [1,5]. Strata ciśnienia w kolanie  $\Delta P_K$  o promieniu krzywizny  $R_K$  [m], średnicy wewnętrznej  $d_K$  [m] i długości zewnętrznej krzywizny  $l_K$  [m] oraz chropowatości bezwzględnej  $k$  [mm], połączonym z odcinkiem prostym rury o średnicy wewnętrznej  $d$  [m] zależy od

średniej prędkości przepływu cieczy za przeszkodą  $v$  [m/s] oraz od własności fizycznych cieczy – gęstości  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] i współczynnika lepkości dynamicznej  $\mu$  [kg/m·s]. Przyjmując jako parametry wymiarowo niezależne  $v$ ,  $\rho$ ,  $d$ , po przekształceniach otrzymano:

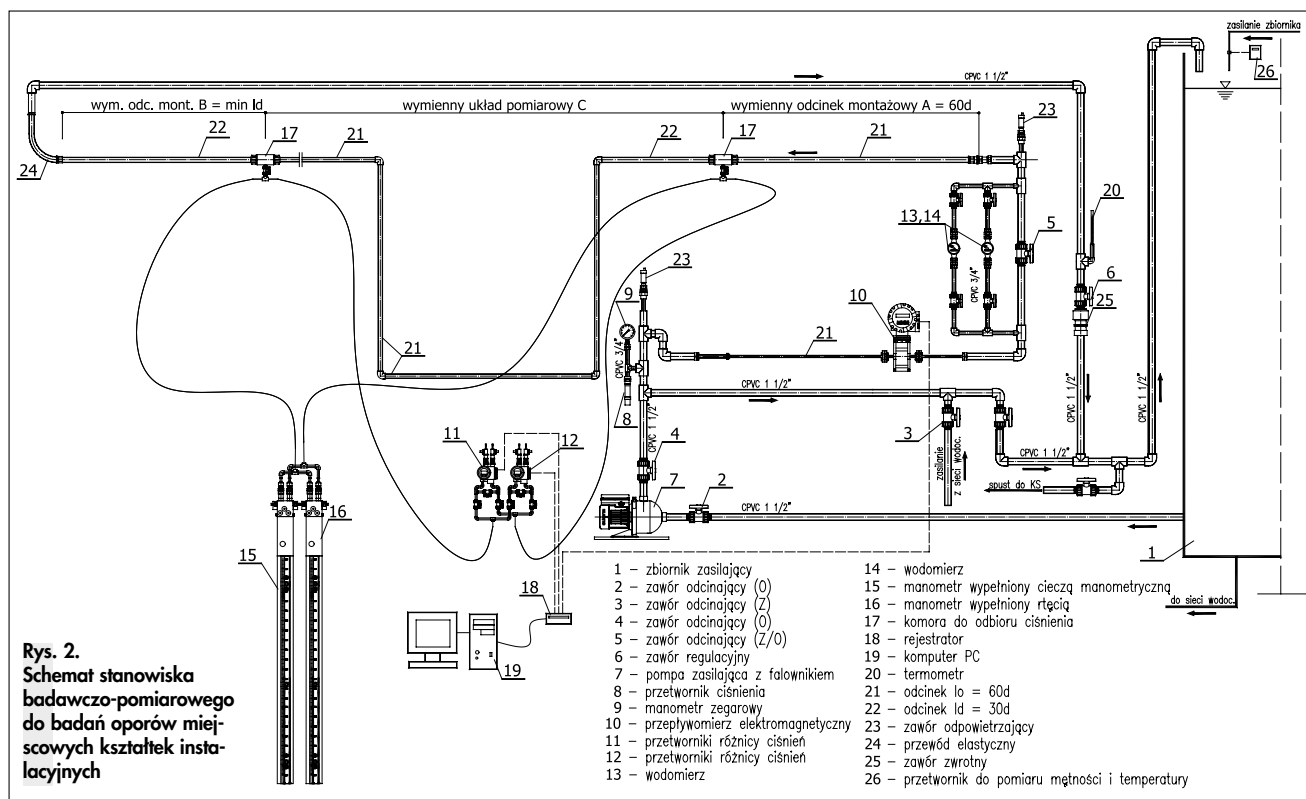
$$\Delta P_K = \zeta \left( \text{Re}, \frac{R_K}{d}, \frac{d_K}{d}, \frac{l_K}{d}, k \right) \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Z uwagi na prowadzenie badań w zakresie przepływów odpowiadających strefie rur hydraulicznie gładkich [7], co jest równoznaczne przyjęciu  $\varepsilon=0$ , z dalszej analizy wyeliminowano wpływ chropowatości. Stąd ostatecznie zależność powyższa przyjmie postać:

$$\Delta P_K = \zeta \left( \text{Re}, \frac{R_K}{d}, \frac{d_K}{d}, \frac{l_K}{d} \right) \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$



**Rys. 3.** Fotografia stanowiska badawczo-pomiarowego z układem kolan systemu APEX DN20



## Wyniki badań

Na stanowisku badawczo-pomiarowym (rys. 2) przebadano, zgodnie z przyjętą metodyką, trzy układy pomiarowe odcinków prostych i układów kolan o średnicach nominalnych DN 12, 15, 20. Dla uzyskanych wyników pomiarów wykonano estymację nieliniową danych pomiarowych w celu uzyskania analitycznej postaci zależności strat ciśnienia od objętościowego natężenia przepływu, dla każdej średnicy. Na rysunku 4 przedstawiono

wymiarowych liczb podobieństwa określonych z analizy wymiarowej:

$$\zeta = f\left(\text{Re}, \frac{R_K}{d}, \frac{d_K}{d}, \frac{l_K}{d}\right) [-] \quad (5)$$

Z uwagi na to, iż wartości współczynników strat ciśnienia w kolanach wkładanych w rurę są dużo większe niż w kolanach nakładanych [3,4], przypuszczać należy, że opory przepływu wzrastają na skutek nagłego przewężenia. Przewężenie to występuje w obu grupach II1 i II2 i jest

porównywalne. Stąd ostatecznie określono wspólną zależność dla analizowanych kolan. Równanie estymacji nieliniowej, opisujące zależność współczynnika oporów miejscowych od przyjętych bezwymiarowych liczb podobieństwa przyjmuje postać:

$$\zeta = 0,559 \cdot \left(\frac{R_K}{d}\right)^{0,469} \cdot \left(\frac{d_K}{d}\right)^{-4,197} \cdot \left(\frac{l_K}{d}\right)^{1,037} \cdot \text{Re}^{-0,055} [-] \quad (6)$$

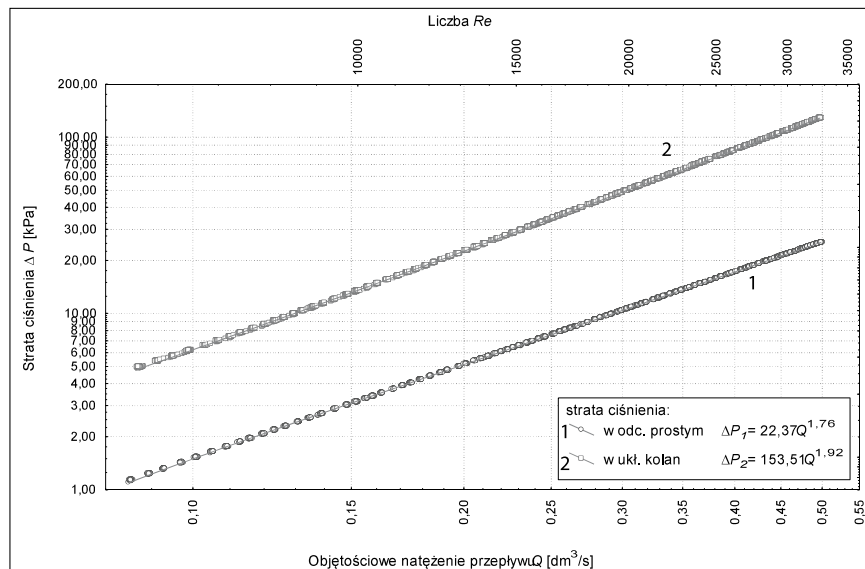
Dla powyższej zależności współczynnik determinacji  $R^2$  wynosi 0,9996 a błąd estymacji 0,046.

Przy założeniu pełnej addytywności błędów przeprowadzone pomiary obarczone są błędem względnym  $\delta\zeta/\zeta$  zgodnie z poniższą tabelą.

Tabela 3. Błędy względne  $\delta\zeta/\zeta$  przy pełnej addytywności

Średnica DN	Prędkość przepływu $v$ [m/s]				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Błąd względny $\delta\zeta/\zeta$ [%]				
12	3,0	1,9	1,6	1,4	1,3
15	2,4	1,5	1,2	1,1	1,0
20	2,1	1,2	1,0	0,9	0,9

Ponieważ, w toku projektowania instalacji wodociągowych, projektanci posługują się prędkością przepływu, a nie liczbą *Reynoldsa*, wygodniejsze jest uzależnienie wartości współczynnika oporów miejscowych  $\zeta$  od prędkości średniej przepływu. Dlatego, dla celów praktycznych, sporządzono nomogram przedstawiający wartość współczynnika  $\zeta$  w funkcji prędkości przepływu (rys. 6).



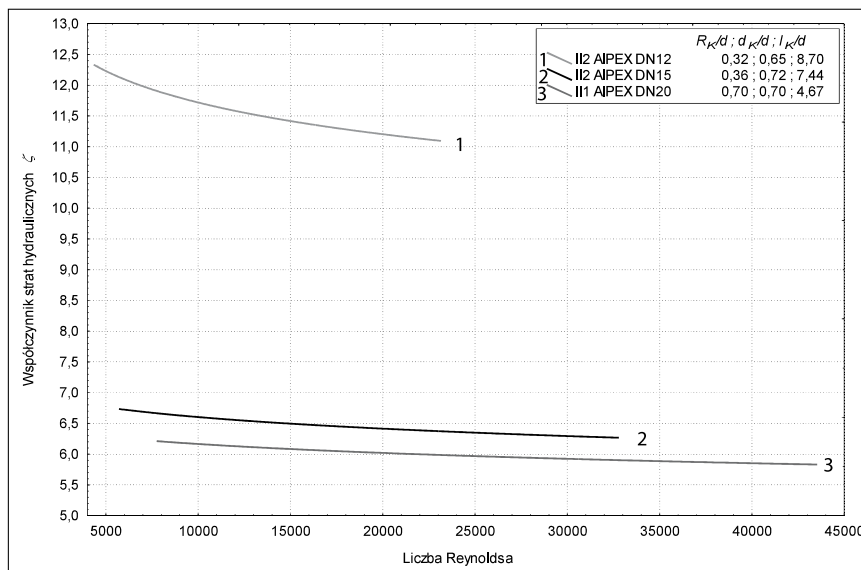
Rys. 4. Doświadczalny wykres strat ciśnienia w odcinku prostym i układzie kolan dla DN20 systemu APEX

Tabela 2. Zależności strat ciśnienia od objętościowego natężenia przepływu dla analizowanych układów pomiarowych

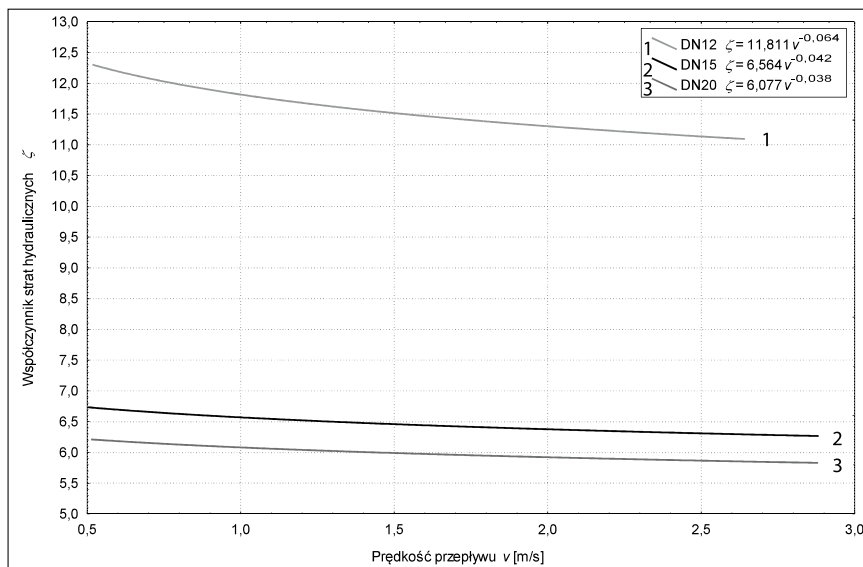
Średnica nominalna DN	Strata ciśnienia w odcinku prostym [kPa]	Współczynnik determinacji $R^2$ [%]	Strata ciśnienia w układzie kolan [kPa]	Współczynnik determinacji $R^2$ [%]
12	$\Delta P_p = 329,294Q^{1,766}$	99,997	$\Delta P_z = 2166,916Q^{1,909}$	99,990
15	$\Delta P_p = 85,634Q^{1,751}$	99,997	$\Delta P_z = 487,722Q^{1,911}$	99,996
20	$\Delta P_p = 22,367Q^{1,762}$	99,994	$\Delta P_z = 153,512Q^{1,917}$	99,991

doświadczalne zależności strat ciśnienia w odcinku prostym oraz układzie kolan w funkcji natężenia przepływu dla średnicy DN20. Zestawienie uzyskanych zależności dla wszystkich badanych kształtek wraz ze współczynnikami determinacji zamieszczono w tabeli 2.

Na podstawie zależności przedstawionych powyżej (tab. 2) oraz wzorów (1) i (2) wyznaczono analityczną i graficzną postać związku współczynnika oporów miejscowych  $\zeta$  i liczby *Re* badanych kształtek. Graficzną zależność współczynnika oporów miejscowych  $\zeta$  od liczby *Re* dla danego kolana (charakteryzującego się określonymi stosunkami geometrycznymi wielkości wymiarowych  $R_K/d$ ,  $d_K/d$ ,  $l_K/d$ ) przedstawiono na rysunku 5. Na podstawie otrzymanych wyników określono równanie estymacji nieliniowej w funkcji bez-



Rys. 5. Wykres zależności współczynnika  $\zeta$  od liczby Reynoldsa dla analizowanych kolan systemu APEX



Rys. 6  
Nomogram do określania wartości współczynnika strat miejscowych  $\zeta$  w zależności od prędkości przepływu dla kolan systemu AlPEX

## Wnioski

1. Eksperymentalne wyznaczenie zależności określających współczynnik strat hydraulicznych  $\zeta$  kolan  $90^\circ$  systemu AlPEX wykazało, że wpływ na jego wartość mają parametry geometryczne takie jak:  $R_K/d$ ,  $d_K/d$ ,  $l_K/d$  oraz liczba Reynoldsa. Na podstawie otrzymanego równania estymacji (6) wynika, że wiodące znaczenie mają liczby podobieństwa geometrycznego.
2. Otrzymane równanie odnosi się ściśle do analizowanych kolan w zakresie

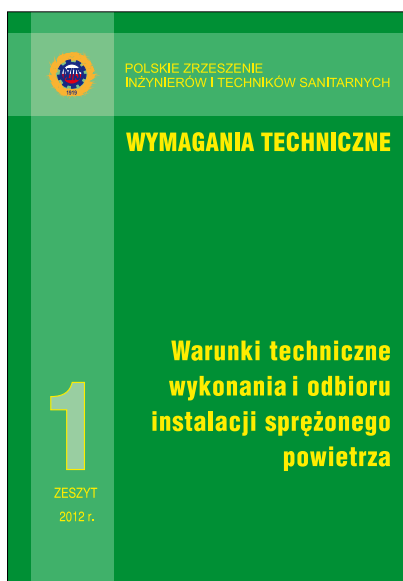
- wartości bezwymiarowych liczb podobieństwa wynikających z zakresu prowadzonych badań oraz przyjętych założeń. Wzór ten może być stosowany pod warunkiem zachowania zakresu wartości bezwymiarowych liczb podobieństwa. Wzór może być łatwo zaimplementowany w oprogramowaniu do obliczeń hydraulicznych.
3. Wartości współczynników strat miejscowych  $\zeta$  w zakresie zalecanych prędkości przepływów (0,5-2,5 m/s) są większe 8,7-15,6 razy względem podawanych w normie [6] i 1,8 do 3,2

razy względem spotykanych w instrukcjach do projektowania. Wobec użytych wartości współczynników  $\zeta$  wskazane jest w instalacjach zastępowanie, w miarę możliwości, kolan łukami giętymi.

4. Uzyskane wyniki badań wskazują na potrzebę przeprowadzenia kompleksowych badań obejmujących pozostałe kształtki instalacyjne.

## LITERATURA

- [1] Chadwick A., Morfett J.: Hydraulics in Civil and Environmental Engineering. London 1993.
- [2] Grajper P.: Eksperymentalne wyznaczenie miejscowych strat ciśnienia w kolanach  $90^\circ$  współczesnych systemów instalacyjnych, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2004.
- [3] Grajper P. Zakrzewska A. Eksperymentalne wyznaczenie współczynników miejscowych strat ciśnienia w kolanach instalacyjnych  $90^\circ$  z miedzi. Technologia Wody 2016 nr 6 s. 24-28
- [4] Grajper P. Krzeszowski Ś. Eksperymentalne wyznaczenie współczynników miejscowych strat ciśnienia w kolanach instalacyjnych  $90^\circ$  z polipropylenu. Technologia Wody 2018 nr 6 s. 48-51
- [5] Mitosek M.: Mechanika płynów w Inżynierii Środowiska. OWPW Warszawa 1997.
- [6] Norma DIN 1988 Technische Regeln für Trinkwasser – Installationen (TRWI) Ermittlung der Rohrdurchmesser Technische Regel des DVGW Teil 3.
- [7] Siwiec T.: Kryterium wyboru metody obliczania oporów liniowych w rurach z tworzyw sztucznych. Instal 11/2002, s. 69-72



Warunki techniczne wykonania i odbioru instalacji sprężonego powietrza” adresowane są głównie do wykonawców instalacji sanitarnych, inspektorów nadzoru jak również służb zajmujących się eksploatacją.

## Warunki techniczne wykonania i odbioru instalacji sprężonego powietrza

Niewątpliwie będą one również przydatne dla projektantów instalacji sprężonego powietrza oraz studentów inżynierii środowiska, w ramach której wykładany jest przedmiot: instalacje specjalne.

Obecnie sprężone powietrze jest jednym z szerzej stosowanych nośników energii. Ma ono zastosowanie prawie we wszystkich gałęziach przemysłu, od spożywczego do maszynowego czy też ciężkiego włącznie, a także w stomatologii, medycynie, energetyce, oczyszczalniach ścieków i w wielu innych dziedzinach. Różne jest więc jego zastosowanie a zatem i różne są wymagania co do jego parametrów oraz klasy czystości.

Ważną sprawą przy instalacjach sprężonego powietrza jest oszczędność energii, chociaż mogłoby się wydawać, że zagadnienie to jest dalekie od kwestii związanych z wykonaniem i eksploatacją systemów sprężonego powietrza, ale to pozory. Każda bowiem nieszczelność układu sprężonego powietrza przyczynia się do ucieczki powietrza do atmosfery a tym samym do konieczności dostarczenia energii do wytworzenia sprężonego powietrza brakującego w instalacji. Również źle zaprojektowana (niewłaściwe średnice) i wykonana instalacja będzie generowała niepotrzebne straty.

Cena 1 egz. 40 zł + 5% VAT

Sprzedaż prowadzi:

Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”

02-671 Warszawa, ul. Marynarska 14 | tel. (22) 843-77-71 | e-mail: wydawnictwo@informacjainstal.com.pl