

Piotr Wichowski, Tadeusz Siwiec, Marek Kalenik, Dariusz Morawski

**BADANIA ZAKRESU STOSOWANIA WZORU
COLEBROOKA-WHITE’A DO OBLICZANIA
LINIOWYCH OPORÓW HYDRAULICZNYCH
W KANALIZACJI CIŚNIENIOWEJ**

***TESTS OF THE APPLICATION RANGE
OF COLEBROOK-WHITE FORMULA FOR
THE CALCULATION OF LINEAR HYDRAULIC
RESISTANCE IN PRESSURE SEWAGE SYSTEMS***

Streszczenie

W artykule porównano liniowe straty hydrauliczne obliczone ze wzorów Colebrooka-White’a, Prandtla-Karmana oraz Blasiusa z pomierzonymi na stanowisku pomiarowym w rurociągach ciśnieniowych o średnicach 63, 75 i 90 mm, wykonanych z PVC i PE. Rurociągi ułożono w pętle, przez które przepływały ścieki o zawartości zawiesiny około 460 mg/dm³.

W badaniach stwierdzono, że dokładność wzoru Colebrooka-White’a w porównaniu do wzorów Prandtla-Karmana i Blasiusa jest największa (wyjątek stanowi średnica PVC 63). Nie oddaje on jednak właściwie charakteru zmian liniowych strat ciśnienia wraz ze wzrostem prędkości. Charakter ten lepiej oddają wzory dla rur hydraulicznie gładkich, szczególnie wzór Prandtla-Karmana. Różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi i obliczonymi dla badanego zakresu średnic i prędkości nie przekraczają 10%. W większości przypadków jednak wartości obliczone są mniejsze od pomierzonych.

Słowa kluczowe: kanalizacja ciśnieniowa, liniowe opory hydrauliczne, wzór Colebrooka-White’a, rury PVC, PE

Summary

The article compares linear hydraulic losses calculated from Colebrook-White, Prandtl-Karman and Blasius formulas with the measured on a test pressure in pipelines with the diameter of 63, 75 and 90 mm, made of PVC and PE. The pipelines were arranged in loops through which flew sewage with the suspension contents of about 460mg/dm³.

As a result of the tests it was established that the accuracy of the Colebrook-White formula is higher than that of Prandtl-Karman and Blasius formulas (the only exception being the diameter of PVC63). However, it does not reflect properly the character of changes of linear pressure losses that accompany the increase of the speed. This character is better reflected by formulas for hydraulically smooth pipes, particularly by the Prandtl-Karman formula. Differences between values measured and calculated for the tested scope of diameters and speeds do not exceed 10%. In most cases, however, the calculated values are smaller than the measured ones.

Key words: pressure sewage system, linear hydraulic resistance, Colebrook-White formula, PVC, PE pipes

WSTĘP

Zgodnie z zaleceniami normy [PN-EN 1671 2001] współczynnik liniowych strat hydraulicznych w układach kanalizacji ciśnieniowej oblicza się ze wzoru Colebrooka-White'a (1) [Colebrook, White 1937; Colebrook 1939].

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right) \quad (1)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa [-],

$\varepsilon(e)$ – współczynnik chropowatości względnej [-].

Chropowatość względna wyrażana jest jako stosunek chropowatości bezwzględnej powierzchni rury do jej średnicy wewnętrznej (wzór (2)) [Grabarczyk 1997].

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad (2)$$

gdzie:

k – współczynnik chropowatości bezwzględnej [m],

d – średnica wewnętrzna [m].

Liczba Reynoldsa, pokazana wzorem (3) jest to zależność funkcyjna trzech zmiennych: prędkości przepływu, średnicy wewnętrznej przewodu oraz kinematycznego współczynnika lepkości cieczy [Szpindor 1998]. W obliczeniach hydraulicznych często przyjmuje się kinematyczny współczynnik lepkości dla ścieków taki jak dla wody w porównywalnej temperaturze.

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (3)$$

gdzie:

- v – przeciętna prędkość przepływu [m/s],
- d – średnica wewnętrzna rurociągu [m],
- ν – kinematyczny współczynnik lepkości [m²/s].

Podczas przepływu cieczy w przewodzie powstają dwa rodzaje strat hydraulicznych. Jedne wywołane są oporami liniowymi związanymi z tarcieniem strumienia lepkiej cieczy o ściankę rurociągu, a drugie zwane oporami miejscowymi powstają na skutek przepływu strumienia przez te elementy konstrukcji rurociągu, które powodują lokalne geometryczne odkształcenia strumienia.

Wysokość sumarycznych strat ciśnienia wywołanych oporami liniowymi i lokalnymi możemy obliczyć ze wzoru Darcy-Weisbacha (4) [Grabarczyk 1997]:

$$\Delta h = \left(\sum \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4} \quad (4)$$

gdzie:

- ζ – współczynnik oporu miejscowego [-],
- λ – współczynnik oporu liniowego [-],
- l – długość rurociągu [m],
- d – średnica wewnętrzna rurociągu [m],
- Q – przepływ [m³/s],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²].

Gdy mamy do czynienia z przewodem hydraulicznie długim, straty miejscowe są pomijalnie małe i współczynnik ζ może być odrzucony.

Zgodnie z normą [PN-76/M-34034] przy przepływie burzliwym ustabilizowanym (tzn. $Re > 4000$) rury można traktować jako hydraulicznie gładkie, gdy względna chropowatość rur jest równa lub mniejsza od granicznej chropowatości. Dla rur z równomierną chropowatością, graniczną chropowatość obliczamy ze wzoru Filonienko-Altšula (5)

$$e_{gran} = \frac{18 \log Re - 16,4}{Re} \quad (5)$$

Gdy liczba Reynoldsa $Re \leq 10^5$ wg wzoru Blasiusa (6)

$$e_{gran} = 17,85 Re^{-0,875} \quad (6)$$

Zgodnie z normą [PN-76/M-34034] współczynnik tarcia dla rur hydraulicznie gładkich ($Re > 4000$, $e \leq e_{gran}$) należy obliczać ze wzoru Prandtla-Karmana (7)

$$\lambda = \left(2 \log \frac{\sqrt{\lambda} Re}{2,51} \right)^{-2} \quad (7)$$

Współczynnik tarcia dla rur chropowatych ($Re > 4000$, $e > e_{gran}$) należy obliczać wg wzoru Colebrooka-White'a (1).

Doświadczalna weryfikacja wzoru (7) wykazała, że daje on wysoką dokładność dla $Re < 3,4 \cdot 10^6$. Dla wartości $Re < 8 \cdot 10^4$ większą dokładność wyników uzyskuje się ze wzoru Blasiusa (8) [Grabarczyk 1997]

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (8)$$

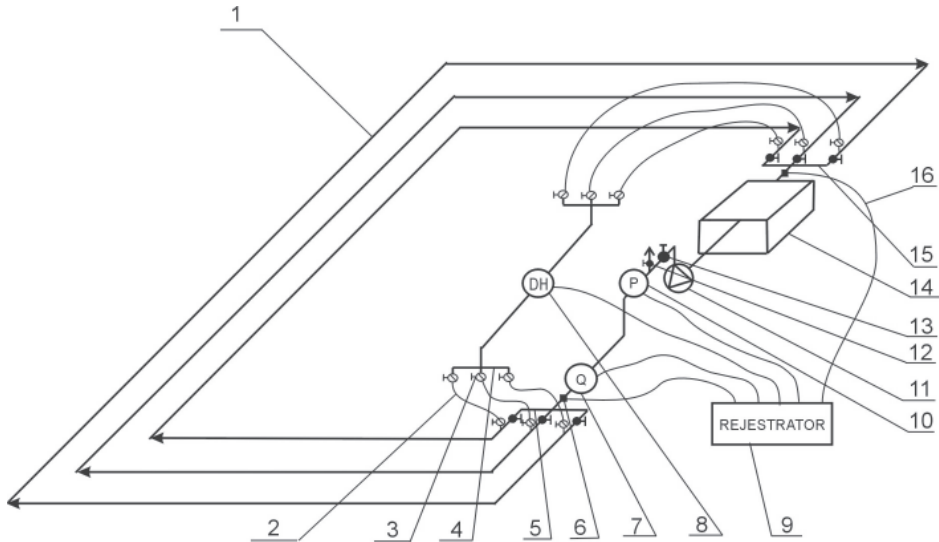
Wzór Colebrooka-White'a jest zalecany do obliczania współczynnika strat liniowych przy projektowaniu systemów wodociągowych [Mielcarzewicz 2000], jednak nie do końca odzwierciedlający hydrauliczne warunki pracy przy ciśnieniowym transporcie ścieków. W przypadku ścieków dyskusyjne są zasady doboru chropowatości bezwzględnej rury. W warunkach eksploatacyjnych dochodzi do ścierania wewnętrznej powierzchni rur, co prowadzi do zmiany ich chropowatości, a także do zmiany powierzchni przekroju wewnętrznego. W przypadku ścieków komunalnych na ściankach przewodów może powstać błona biologiczna wpływająca na wysokość oporów liniowych. Niezależnie od tego rzeczywista chropowatość rur nowych może odbiegać od chropowatości teoretycznych podawanych w wytycznych projektowych. Ponadto w przypadku wykorzystania rur z tworzyw sztucznych, charakteryzujących się niską chropowatością, wpływ chropowatości na wysokość liniowych oporów może być niewielki. Lepiej wówczas zastosować wzory dla rur hydraulicznie gładkich. W świetle normy [PN-76 M-34034] można określić zakres stosowania wzoru Colebrooka-White'a odnosząc chropowatość rur kanalizacyjnych do chropowatości granicznej przy znanej liczbie Reynoldsa.

Powyższe wątpliwości uzasadniają potrzebę wykonania eksperymentalnych badań oporów hydraulicznych na stanowisku pomiarowym. Przeprowadzone badania dostarczą wyników empirycznych, które zostaną porównane ze stratami hydraulicznymi obliczonymi.

METODYKA BADAŃ

W celu zrealizowania zadania badawczego skonstruowano stanowisko do przeprowadzenia eksperymentu według schematu przedstawionego na rysunku 1.

Stanowisko jest zbudowane z rur 1, które stanowią badane odcinki symulujące rurociągi kanalizacji ciśnieniowej. Badania przeprowadzono dla rurociągów z PVC o średnicach i długościach: $d = 63 \times 3,0 \text{ mm}$, $l = 128,7 \text{ m}$; $d = 75 \times 3,6 \text{ mm}$, $l = 129,7 \text{ m}$ i $d = 90 \times 4,3 \text{ mm}$, $l = 131,4$ oraz rurociągów z PE: $d = 63 \times 3,8 \text{ mm}$, $l = 126,75 \text{ m}$; $d = 75 \times 4,5 \text{ mm}$, $l = 125,32$ i $d = 90 \times 5,4$, $l = 123,50$. Do badań wykorzystano rury produkcji Firmy Gamrat. Na początku i końcu badanych rur podłączone są przewody impulsowe ciśnienia 2.



Rysunek 1. Schemat stanowiska badawczego do pomiaru oporów hydraulicznych w przewodach kanalizacji ciśnieniowej: 1 – badane przewody kanalizacji ciśnieniowej, 2 – rurki impulsowe ciśnienia, 3 - kulowe zaworki odcinające na przewodach impulsowych, 4 - rozdzielacz dla przewodów impulsowych, 5 – rozdzielacz zasilający, 6 – czujnik temperatury, 7 – przepływomierz elektromagnetyczny, 8 – elektroniczny miernik różnicy ciśnień, 9 - rejestrator elektroniczny, 10 – ciśnieniomierz elektroniczny, 11 – pompa obiegowa, 12 – odpowietrzenie, 13 – zawór dławiący (przepustnica), 14 – wyrównawczy zbiornik przepływowy, 15 – rozdzielacz powrotny, 16 – przewody przesyłu danych do rejestratora.

Figure 1. Outline of the testing post used for the calculation of hydraulic resistance in pipes of a pressure sewage system: 1 – tested pipes of the pressure sewage system, 2 – impulse pressure pipes, 3 – cut-off ball valves on impulse pipes, 4 – separator for impulse pipes, 5 – power distributor, 6 – temperature sensor, 7 – electromagnetic flowmeter, 8 – electronic meter of pressure differences, 9 – electronic recorder, 10 – electronic pressure gauge, 11 – circulation pump, 12 – vent, 13 – throttle (choke) valve, 14 – compensatory equalizing tank, 15 – return distributor, 16 – cables for the transfer of data to the recorder

Duża długość odcinków pomiarowych wpływa na większą dokładność uzyskanych wyników. Przy dużej długości pętli można wyprofilować łuki o dużym promieniu, aby maksymalnie ograniczyć wpływ strat miejscowych. Odcinki pomiarowe można wówczas traktować jako rury hydraulicznie długie. Rozdział ścieków do badanych rur następuje przez kolektor rozdzielczy 5. Na końcach badanych rur zamontowano rozdzielacz powrotny 15. Układ wyposażony jest w odpowietrznik 12 oraz przepływowy zbiornik wyrównawczy 14. Ważnym elementem stanowiska są urządzenia pomiarowe: przepływomierz elektromagnetyczny Promag 53 P Firmy Endress+Hauser 7, miernik różnicy ciśnień na

początku i końcu odcinków pomiarowych Deltabar S PMD70 Firmy Endress+Hauser 8 oraz czujniki temperatury Easytemp TMR31 Firmy Endress+Hauser 6. Rejestrator Memograph M RSG40 Firmy Endress+Hauser 9 umożliwia automatyczną rejestrację uzyskanych pomiarów. Zapis w rejestratorze następował z interwałem czasowym wynoszącym 1s. Pozwalało to na uzyskanie znacznej ilości danych.

Instalacja jest wyposażona w pompę 11 umożliwiającą cyrkulacyjny przepływ ścieków w badanych rurach z prędkościami w zakresie ok. 0,3-3,2 m/s. Aby uzyskać założone do badań prędkości przepływu ścieków, na króćcu tłocznym pompy zainstalowany jest zawór dławiący 13 pozwalający na regulację ilości przepływających ścieków. Aby uzyskać prawidłowe wyniki pomiarów istotne jest dokładne odpowietrzenie całej instalacji eksperymentalnej, łącznie z przewodami impulsowymi ciśnienia i miernikiem różnicy ciśnienia

Badaniom zostały poddane ścieki sanitarne ujmowane z komory krat komunalnej oczyszczalni ścieków w Piasecznie. Ścieki te bezpośrednio po pobraniu zostały przewiezione i wprowadzone do przewodów stanowiska badawczego. Badania przeprowadzono w dniach 19-24 listopada 2010 roku. Dla pobranych ścieków wykonano oznaczenie zawartości suchej masy oraz suchej masy organicznej w Laboratorium Chemii i Technologii Wody i Ścieków zgodnie ze znormalizowaną metodyką [PN-EN 12879; PN-EN 12880, PKN 2004].

Dla ustalonych warunków przepływu rejestrowano wysokość strat ciśnienia Δh , przepływ Q oraz temperaturę na początku i końcu pętli t_1 i t_2 . Pomierzoną wartość strat ciśnienia porównano ze stratami ciśnienia obliczonymi ze wzoru (4). Straty ciśnienia obliczono dla trzech przypadków, wykorzystując odpowiednio wzory (1), (7) i (8) określające współczynnik oporów liniowych.

Kinematyczny współczynnik lepkości ścieków przy znanej temperaturze oraz zawartości zawiesiny przyjęto z literatury [Grabarczyk 1997]. Przepływ ścieków w obiegu zamkniętym i tarcie strumienia o ścianki rurociągów powodowało przyrost temperatury w trakcie pomiarów. Do obliczeń przyjmowano średnią arytmetyczną ze wskazań czujników temperatury usytuowanych na początku i końcu pętli pomiarowej. Do obliczeń chropowatości względnej przyjęto współczynnik chropowatości bezwzględnej $k = 0,02$ dla rur z PVC i $k = 0,01$ dla rur z PE. Są to wielkości zalecane do projektowania przez producenta rur [Katalog techniczny Gamrat 2000].

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

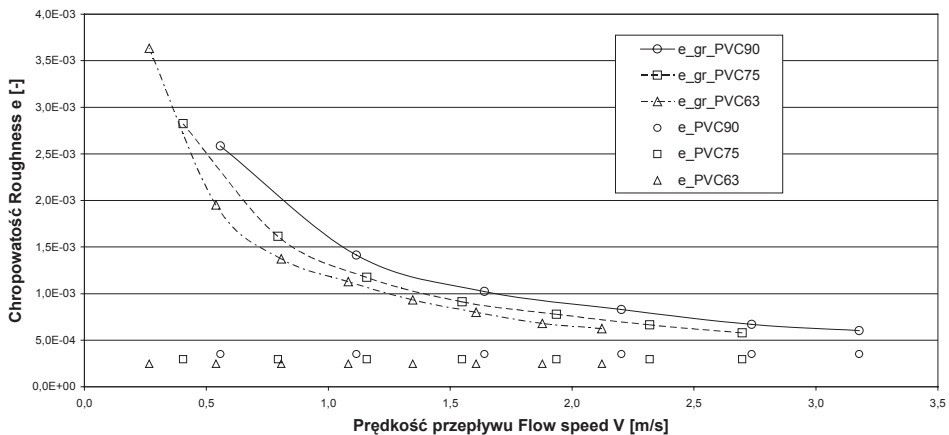
Zawartości zawiesiny w ściekach, które wykorzystano do badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zawartość zawiesiny w ściekach bytowych wykorzystanych do badań
Table 1. Suspension contents in household sewage used for the tests

Numer próby Sample number	Zawiesina Suspension	Pozostałość po spaleniu Dry residue after burning	Sucha masa organiczna Dry organic substance	Sucha masa organiczna Dry organic substance
Jednostka Unit	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	%
1	472,3	169,0	303,3	64,22
2	457,3	157,0	300,3	65,67
3	445,7	163,0	282,7	63,43
Średnia / Average	458,4	163,0	295,4	64,44

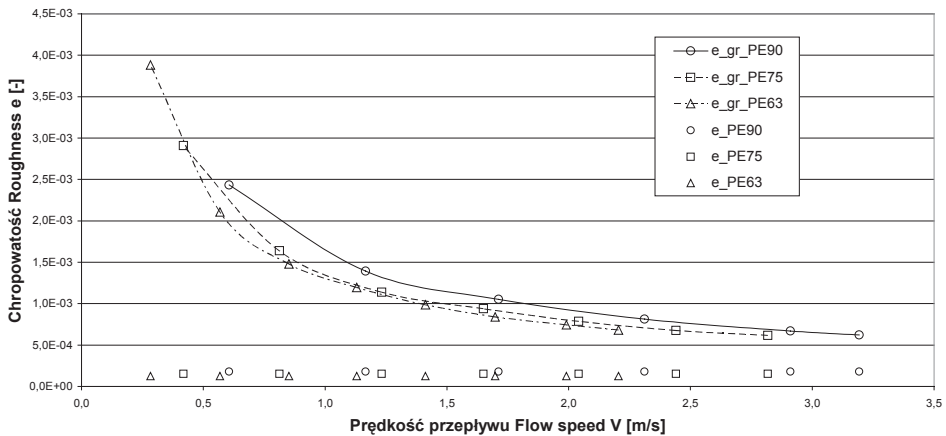
Przeciętna zawartość zawiesiny (tab. 1) w analizowanych ściekach wynosiła około 460 mg/dm³, przy średniej zawartości substancji organicznych około 64,5%.

Wartości „e” i „e granicznego” dla rur z PVC obliczono na podstawie wzorów (2), (5), (6) i przedstawiono na rysunku 2. Analizując rysunek 2 można stwierdzić, że wartość współczynnika chropowatości względnej badanych rur we wszystkich przypadkach nie przekracza wartości granicznej (e_{graniczne}). Zgodnie z zaleceniami normy [PN-76/M-34034] liniowe straty hydrauliczne w rozpatrywanym przypadku powinny być obliczane ze wzoru (7).



Rysunek 2. Wartości e i e_{gr} dla rur z PVC o średnicach 63, 75 i 90 mm
Figure 2. Values of e and e_{gr} for PVC pipes with diameter of 63, 75 and 90 mm

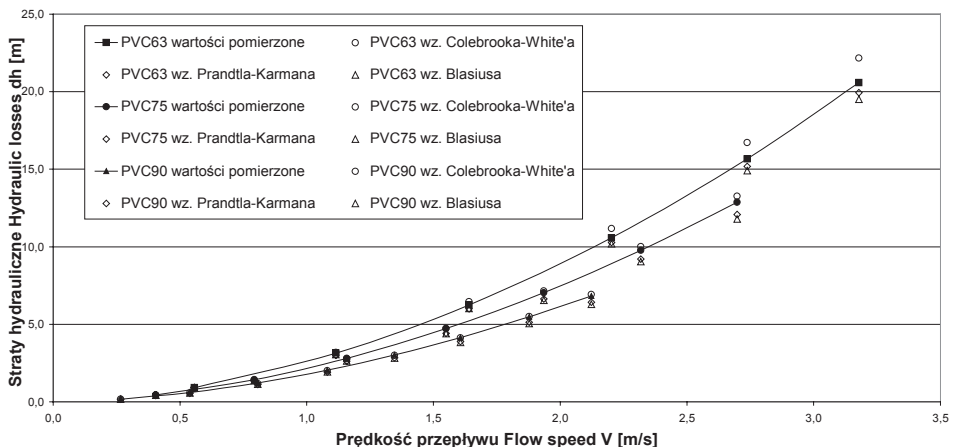
Wyniki obliczeń e i e granicznego dla rur z PE przedstawiono na rysunku 3. Tutaj podobnie jak dla rur z PVC wartości „e” nie przekraczają „e granicznego”. Zatem do obliczenia liniowych strat hydraulicznych powinniśmy również wykonywać wzór (7).



Rysunek 3. Wartości e i e_{gr} dla rur z PE o średnicach 63, 75 i 90 mm
Figure 3. Values of e and e_{gr} for PE pipes with diameter of 63, 75 and 90 mm

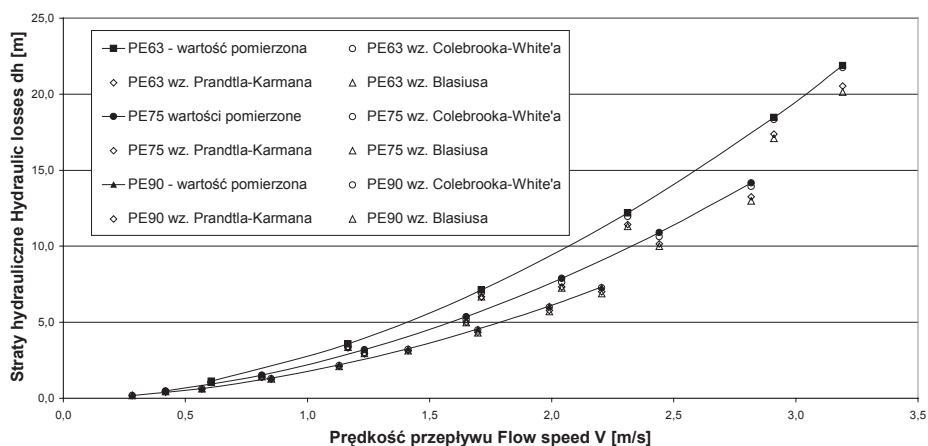
Na podstawie wyników obliczeń przedstawionych na rysunkach 2 i 3 zgodnie z normą [PN-76 M-340348] do obliczeń liniowych strat hydraulicznych powinien być wykorzystywany wzór Prandtla-Karmana (7) właściwy dla rur hydraulicznie gładkich. Tymczasem norma [PN-EN 1671] zaleca stosowanie wzoru Colebrooka-White'a (1).

Na rysunkach 4-5 przedstawiono pomierzone i obliczone straty ciśnienia przy zmieniającej się prędkości przepływu ścieków.



Rysunek 4. Wykres strat hydraulicznych obliczonych oraz pomierzonych na stanowisku badawczym dla rur PVC

Figure 4. Graph of hydraulic losses calculated and measured on the testing post for PVC pipes



Rysunek 5. Wykres strat hydraulicznych obliczonych oraz pomierzonych na stanowisku badawczym dla rur PE

Figure 5. Graph of hydraulic losses calculated and measured on the testing post for PE pipes

Błędy względne pomiędzy wartościami obliczonymi oraz pomierzonymi obliczane przy pomocy wzoru (9) [Szydłowski i in. 1981] przedstawiono w tabeli 2.

$$\delta_x = \frac{\Delta h - \Delta h_o}{\Delta h_o} 100\% \quad (9)$$

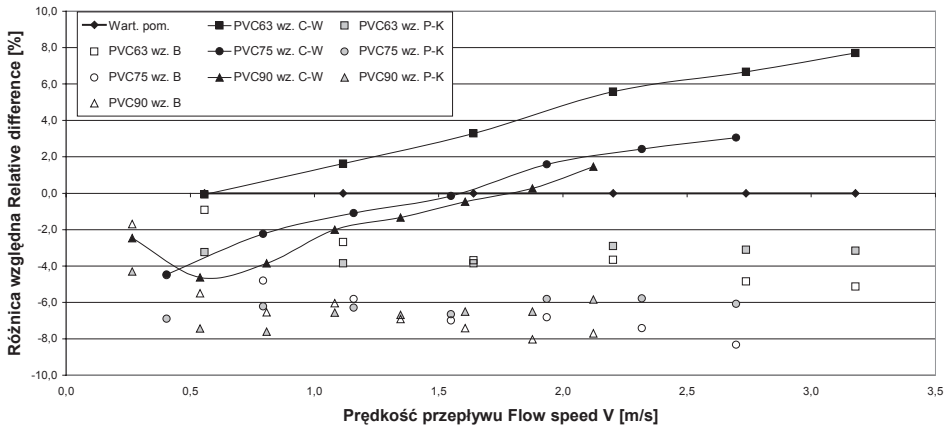
gdzie:

- Δh – wartość obliczona,
- Δh_o – wartość pomierzona.

Celem lepszego zobrazowania przebieg zmienności błędów względnych dla rur PVC i PE w funkcji prędkości przepływu przedstawiono również na rysunkach 6 i 7. Analizując rysunki 6 i 7 można stwierdzić, że średnio dla analizowanego zakresu prędkości najbardziej dokładne wyniki uzyskuje się przy wykorzystaniu wzoru Colebrooka-White'a. Straty obliczone z wykorzystaniem tego wzoru charakteryzują się tendencją rosnącą w stosunku do pomierzonych przy rosnącej prędkości przepływu. Przy obliczeniach strat ze wzoru Prandtla-Karmana oraz Blasiusa, różnica między wartościami pomierzonymi i obliczonymi jest bardziej stabilna w całym zakresie prędkości. Wzory dla rur hydraulicznie gładkich lepiej oddają charakter zmian strat ciśnienia przy zmieniającej się prędkości. Przy niskich prędkościach przepływu obliczamy wyższe straty ciśnienia wykorzystując wzór Blasiusa, przy większych prędkościach wyższe wartości uzyskujemy ze wzoru Prandtla-Karmana. Dla całego analizowanego zakresu prędkości, przeciętne wartości strat ciśnienia obliczone z wzoru Prandtla-Karmana i Blasiusa są bardzo zbliżone do siebie. Różnica nie przekracza 0,4%.

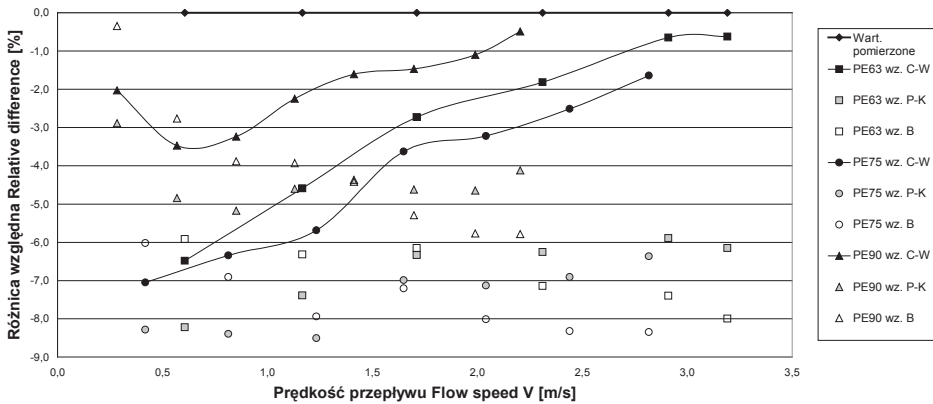
Tabela 2. Błędy względne liniowych strat ciśnienia przy zmieniającej się prędkości przepływu wyrażone w [%]
Table 2. Relative errors of linear pressure losses at changing flow speed in [%]

Rura Pipe	Prędkość przepływu V [m/s] Flow speed		0,56	1,12	1,64	2,20	2,73	3,17	-	-
PVC63	Błąd względny	Wzór Colebrooka – White’a	-0,08	1,62	3,29	5,58	6,67	7,71	-	-
		Wzór Prandtla - Karmana	-3,25	-3,85	-3,85	-2,9	-3,1	-3,16	-	-
		Wzór Blasiusa	-0,92	-2,69	-3,69	-3,67	-4,84	-5,13	-	-
PVC75	Prędkość przepływu Flow speed V [m/s]		0,40	0,79	1,16	1,55	1,94	2,32	2,70	-
	Błąd względny	Wzór Colebrooka – White’a	-4,46	-2,24	-1,1	-0,16	1,59	2,43	3,05	-
		Wzór Prandtla - Karmana	-6,9	-6,22	-6,29	-6,66	-5,81	-5,79	-6,08	-
		Wzór Blasiusa	-4,51	-4,8	-5,81	-7,00	-6,82	-7,42	-8,33	-
PVC90	Prędkość przepływu Flow speed V [m/s]		0,27	0,53	0,81	1,08	1,34	1,61	1,88	2,12
	Błąd względny	Wzór Colebrooka – White’a	-2,47	-4,63	-3,85	-2,00	-1,34	-0,47	0,26	1,46
		Wzór Prandtla - Karmana	-4,31	-7,43	-7,61	-6,56	-6,68	-6,5	-6,5	-5,84
		Wzór Blasiusa	-1,7	-5,51	-6,54	-6,04	-6,91	-7,42	-8,03	-7,71
PE63	Prędkość przepływu Flow speed V [m/s]		0,59	1,17	1,72	2,31	2,91	3,20	-	-
	Błąd względny	Wzór Colebrooka – White’a	-6,48	-4,59	-2,73	-1,82	-0,65	-0,62	-	-
		Wzór Prandtla - Karmana	-8,22	-7,39	-6,33	-6,26	-5,89	-6,15	-	-
		Wzór Blasiusa	-5,91	-6,32	-6,15	-7,15	-7,4	-7,99	-	-
PE75	Prędkość przepływu Flow speed V [m/s]		0,42	0,81	1,23	1,65	2,04	2,44	2,82	-
	Błąd względny	Wzór Colebrooka – White’a	-7,05	-6,34	-5,69	-3,63	-3,22	-2,51	-1,64	-
		Wzór Prandtla - Karmana	-8,28	-8,39	-8,51	-6,99	-7,13	-6,91	-6,37	-
		Wzór Blasiusa	-6,02	-6,91	-7,94	-7,21	-8,01	-8,32	-8,35	-
PE90	Prędkość przepływu Flow speed V [m/s]		0,28	0,57	0,85	1,13	1,41	1,69	1,99	2,20
	Błąd względny	Wzór Colebrooka – White’a	-2,03	-3,47	-3,24	-2,25	-1,6	-1,47	-1,1	-0,48
		Wzór Prandtla - Karmana	-2,89	-4,84	-5,18	-4,6	-4,37	-4,62	-4,65	-4,12
		Wzór Blasiusa	-0,35	-2,76	-3,88	-3,93	-4,41	-5,29	-5,77	-5,78



Rysunek 6. Błędy względne pomiędzy wartościami obliczonymi ze wzorów Colebrooka-White’a, Prandtla-Karmana i Blasiusa, a pomierzonymi dla rur z PVC w funkcji prędkości przepływu

Figure 6. Relative errors between values calculated from Colebrook-White, Prandtl-Karman and Blasius formulas and those measured for PVC pipes as a function of the flow speed



Rysunek 7. Błędy względne pomiędzy wartościami obliczonymi ze wzorów Colebrooka-White’a, Prandtla-Karmana i Blasiusa, a pomierzonymi dla rur z PE w funkcji prędkości przepływu

Figure 7. Relative errors between values calculated from Colebrook-White, Prandtl-Karman and Blasius formulas and those measured for PE pipes as a function of the flow speed

Przy prędkościach przepływu poniżej 0,5 m/s obserwuje się wzrost wartości obliczonych w stosunku do pomierzonych. Spowodowane jest to obniżoną dokładnością urządzeń pomiarowych przy dolnych wartościach zakresu pomiarowego. Standardowa dokładność przepływomierza Promag 53 P wynosi $\pm 0,2\%$, natomiast miernika różnicy ciśnień Deltabar S PMD70 $\pm 0,15\%$ [Katalog Firmy Endress+Hauser 2010]. Błąd odczytu rośnie jednak znacząco przy niskich przepływach i niskich różnicach ciśnień.

Dokładność szacowania strat hydraulicznych na etapie projektowania ma zasadnicze znaczenie dla właściwego doboru średnic przewodów transportujących ścieki oraz układów pompowych. W praktyce chropowatość ścianek rur nowych może nieznacznie różnić się od podawanej przez producenta, co przekłada się na straty ciśnienia. Dodatkowo przekrój poprzeczny rur może nie być dokładnie kołowy. Zaobserwowano, że rury z tworzyw sztucznych składowane na słońcu nagrzewają się, co może prowadzić do odkształcenia przekroju poprzecznego rury. Podczas badań stwierdzono jednak, że różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi i obliczonymi nie przekraczają 10%. Są to różnice relatywnie niewielkie, dopuszczalne dla obliczeń inżynierskich. Problemem natomiast jest to, że w większości przypadków (z wyjątkiem średnicy PVC 63 i wykorzystaniu wzoru Colebrooka-White'a) straty ciśnienia obliczone są mniejsze od pomierzonych. Może to skutkować doбором nieodpowiednich pomp.

Wzór Colebrooka-White'a lepiej opisuje straty od wzoru Prandtla-Karmana i Blasiusa, gdyż obserwowano mniejsze błędy względne pomiędzy wartościami pomierzonymi a obliczonymi dla badanych ścieków (wyjątek stanowi średnica PVC63). Dla analizowanych przypadków straty obliczane ze wzoru Prandtla-Karmana i Blasiusa charakteryzowały się podobną różnicą przy zmieniających się prędkościach przepływu, w przypadku stosowania wzoru Colebrooka – White'a różnica zmieniała się wraz ze zmianą prędkości przepływu. Przy czym zaobserwowano, że wraz ze wzrostem prędkości następował wyraźny wzrost wartości obliczonych w odniesieniu do pomierzonych.

Analizując dokładność wzoru Colebrooka-White'a w odniesieniu do wzorów Prandtla-Karmana i Blasiusa możemy stwierdzić, że przeciętnie dla całego zakresu prędkości daje on wyniki najbliższe pomierzonym. Jednocześnie poziom strat obliczonych w stosunku do pomierzonych ma tendencję rosnącą wraz ze wzrostem przepływu. Nie oddaje on zatem właściwie charakteru zmian liniowych strat ciśnienia wraz ze wzrostem prędkości. Charakter ten lepiej odwzorowują wzory dla rur hydraulicznie gładkich, szczególnie wzór Prandtla-Karmana. Zgodnie z literaturą [Schlichting 1964] przy niższych prędkościach (niższa liczba Reynoldsa) bardziej dokładny jest wzór Blasiusa, przy wyższych Prandtla-Karmana. Dla całego zakresu wartości obliczone liniowych strat ciśnienia są mniejsze od pomierzonych. Podsumowując, żaden ze wzorów nie oddaje w pełni hydraulicznych warunków przepływu ścieków w rurociągach ciśnieniowych. Należy zatem opracować nową formułę, która będzie miała podobną konstrukcję jak wzory dla rur hydraulicznie gładkich, ale będzie pozwalała na obliczenie wyższych liniowych strat ciśnienia.

PODSUMOWANIE

1. Wzór Colebrooka-White'a lepiej opisuje straty od wzoru Prandtla-Karmana i Blasiusa, mimo, że zgodnie z zaleceniami normy PN-76/M-34034 do obliczenia strat ciśnienia powinien być zastosowany wzór Prandtla-Karmana.

2. Stosując wzór Colebrooka-White'a w sposób wyraźny rosła strata obliczone w stosunku do pomierzonych wraz ze wzrostem prędkości przepływu.

3. Średnia dokładność wzoru Prandtla-Karmana i Blasiusa (dla całego zakresu prędkości) jest podobna, przy czym wzór Blasiusa jest bardziej dokładny przy niższych prędkościach, a Prandtla-Karmana przy wyższych.

4. W większości przypadków różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi, a obliczonymi dla rur z polichlorku winylu są mniejsze niż dla rur wykonanych z polietylenu.

5. Różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi i obliczonymi dla badanego zakresu średnic i prędkości nie przekraczają 10%. W większości przypadków jednak wartości obliczone są mniejsze od pomierzonych.

6. Stosunkowo krótki okres badań, nie odpowiada na pytanie, jak zmieniają się straty liniowe w dłuższej perspektywie czasu. Na powierzchni ścianek może tworzyć się film z błony biologicznej. Wysokie prędkości przepływu ścieków mogą powodować ścieranie się wewnętrznych ścianek rurociągów. W ramach kontynuacji rozpoczęto badania nad ścieraniem się rurociągów szczególnie w newralgicznych miejscach takich jak trójniki i kolana.

BIBLIOGRAFIA

- Colebrook C.F., White C.M.: *Experiments with fluid friction in roughened pipes*. Proceedings of the Royal Society. Ser. A., Vol. 161, 1937, No. A 903, s.367-381,
- Colebrook C.F.: *Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws*. Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 11, 1939, s.133-156.
- Grabarczyk C. *Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe*. Wydawnictwo Envirotech, Poznań 1997, s. 29-33; s. 351.
- Mielcarzewicz E.W. *Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę*. Arkady, Warszawa 2000, s.79.
- Schlichting H.: *Grenzschicht-Theorie*. Karlsruhe 1964,
- Szpindor A. *Zaopatrzenie w wodę i kanalizacja wsi*. Arkady, Wyd. 2 popr., Warszawa 1998, s. 77.
- Szydłowski H. i in. *Teoria pomiarów*. (Praca zbiorowa pod red. H. Szydłowskiego) PWN Warszawa 1981, s.15-25.
- PN-EN 1671: *Zewnętrzne systemy kanalizacji ciśnieniowej*. PKN. Warszawa 2001, s. 10.
- PN-76 M-34034: *Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia*. PKNiM. Warszawa 1977, s. 5-6.
- PN-EN 12879: *Oznaczanie strat przy prażeniu*. PKN. Warszawa 2004,
- PN-EN 12880: *Oznaczanie suchej pozostałości*. PKN. Warszawa 2004,
- Katalog techniczny Firmy Gamrat. Jasło 2000, s. 77.
- Katalog Firmy Endress+Hauser. 2010. Karta katalogowa urządzenia Promag 53P s.13, karta katalogowa urządzenia Deltabar S PMD 70 s24, (www.pl.endress.com).

Dr inż. Piotr Wichowski

e-mail: piotr_wichowski@sggw.pl

Dr hab. inż. Tadeusz Siwiec

e-mail: tadeusz_siwiec@sggw.pl

Dr inż. Marek Kalenik

e-mail: marek_kalenik@sggw.pl

Mgr inż. Dariusz Morawski

e-mail: morawski.dariusz@wp.pl

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Inżynierii Budowlanej

Zakład Wodociągów i Kanalizacji

ul. Nowoursynowska 159

02-776 Warszawa

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Ryszard Ślizowski*