

Piotr Wichowski, Marek Kalenik, Tadeusz Siwiec, Dariusz Morawski

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW LINIOWYCH OPORÓW HYDRAULICZNYCH W RURACH PE I PVC STOSOWANYCH W KANALIZACJI CIŚNIENIOWEJ

DETERMINE OF LINEAR LOSSES COEFFICIENTS IN PE AND PVC PIPES USED IN THE PRESSURE SEWAGE SYSTEM

Streszczenie

Do projektowania systemów kanalizacji ciśnieniowej, budowanych z rur PE i PVC, niezbędne są obliczenia hydrauliczne, które uwzględniałyby właściwości fizyczne ścieków i rur. W obowiązującej normie [PN-EN 1671 2001], brakuje odpowiednich wzorów, które uwzględniałyby te właściwości. W związku z tym, w niniejszym artykule, została przedstawiona metodyka i wyniki eksperymentalnych badań, których celem było wyznaczenie empirycznej zależności do obliczania współczynników liniowych oporów hydraulicznych w rurach PE i PVC, podczas ciśnieniowego przepływu ścieków. Wykazano, że przepływ ścieków w rurach z PVC i PE ma charakter przepływu w rurach hydraulicznie gładkich, a współczynniki liniowych oporów hydraulicznych λ_s wyznaczone z badań eksperymentalnych w rurach z PVC i PE przyjmują porównywalne wartości, które w przedziale zalecanej prędkości v są większe do wartości $\lambda_{sBlasius}$ obliczonych ze wzoru Blasiusa.

Słowa kluczowe: ścieki, system kanalizacji ciśnieniowej, współczynnik liniowych oporów hydraulicznych, rury PE i PVC

Summary

To designing of the pressure sewage systems, built of pipes PE and PVC, essential are hydraulic calculations, which would consider physical properties of sewage. In the applying norm [PN-EN 1671 2001], missing right formulae which would consider these properties. In connection with it, in this article, remained

introduced methodology and results of experimental researches, which was a purpose, determine empirical relation for calculate linear losses coefficients in pipes PE and PVC, during the pressure flow sewages. Showed that the flow of sewage had character in pipes of PVC and PE of flow in pipes hydraulic smooth, and linear losses coefficients λ_s determined from experimental research in pipes of PVC and PE is taking comparable value, which in the range for the recommended speed v are bigger to value $\lambda_{sBlasius}$ calculated from the Blasius formula.

Key words: sewage, pressure sewage system, linear losses coefficient, pipes of PE and PVC

WPROWADZENIE

System kanalizacji ciśnieniowej stanowi alternatywne rozwiązanie dla kanalizacji grawitacyjnej szczególnie, gdy spadki terenu i warunki hydrogeologiczne są niekorzystne do jej zastosowania [Kalenik 2011]. Obecnie najczęściej buduje się go na obszarach wiejskich o bardzo zróżnicowanej topografii terenu.

Elementy składowe kanalizacji ciśnieniowej projektuje się na przepustowość wyrażoną maksymalnym godzinowym przepływem ścieków Q_{hmax} uwzględniając prawdopodobną liczbę jednocześnie pracujących pomp w szczytowej godzinie dopływu ścieków do przydomowych pompowni [Szabo 1990]. Aby dla poszczególnych przydomowych pompowni ścieków dobrać odpowiednie pompy, należy dla wyznaczonego przepływu ścieków Q_{hmax} obliczyć straty hydrauliczne ΔH jakie powstaną w rurociągach podczas transportu ścieków do oczyszczalni. Na wielkość strat hydraulicznych ΔH w rurociągach, podczas transportu ścieków mają głównie wpływ hydrauliczne opory liniowe, które są określane odpowiednim współczynnikiem λ . Obecnie obowiązująca norma PN-EN 1671 [2001] zaleca obliczać straty hydrauliczne tak jak dla czystej wody ze wzoru Darcy-Weisbacha. Dotychczas przeprowadzone badania pokazują [Grabarczyk i in. 2001a, 2001b, Siwiec i in. 2001], że takie podejście nie jest do końca słuszne.

W związku z tym, w niniejszym artykule została przeprowadzona analiza uzyskanych wyników badań, których głównym celem było wyznaczenie wzorów empirycznych do obliczania współczynników liniowych oporów hydraulicznych λ_s podczas ciśnieniowego przepływu ścieków w rurociągach z tworzywa sztucznego (PVC i PE) oraz porównanie współczynników λ_s obliczonych za pomocą wyznaczonych wzorów empirycznych ze współczynnikami $\lambda_{sBlasius}$ wyznaczonymi ze wzoru Blasiusa. Zakres badań obejmował średnice rur 90, 75, 63 mm. Badania zostały wykonane w ramach grantu MNiSW: NN523422637.

METODYKA BADAŃ

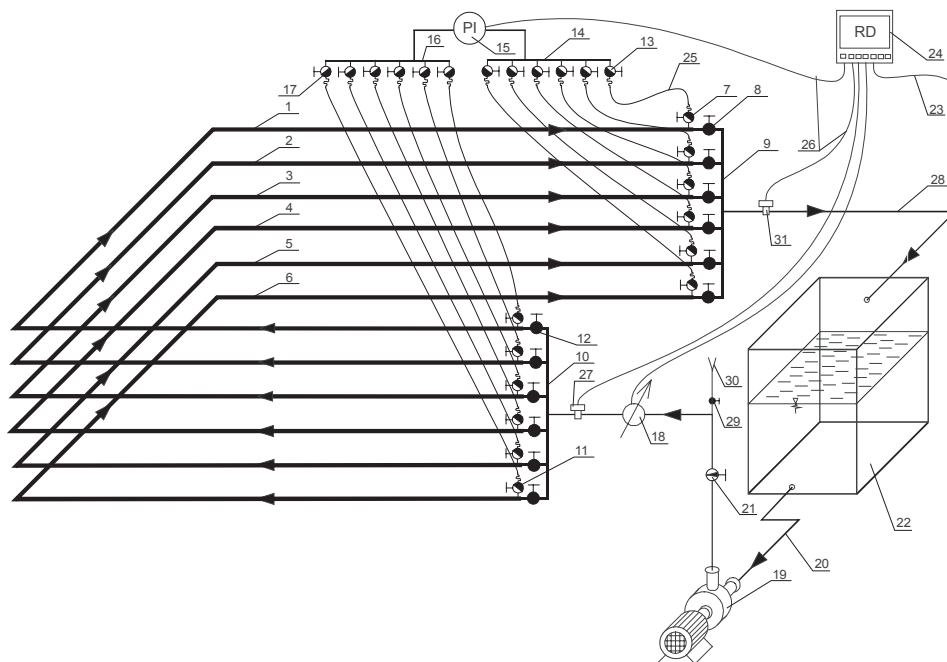
Do przeprowadzenia eksperymentalnych badań, a następnie wyznaczenia współczynników liniowych oporów hydraulicznych dla ścieków λ_s , zostało wybudowane stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko pomiarowe zbudowane zostało w postaci pętli z rur ciśnieniowych firmy Gamrat [2000], wykonanych z polichlorku winylu - PVC PN 10 i polietylenu - PE PN 8. Badane rury miały następujące średnice zewnętrzne D , grubości ścianek h i długości l :

– PVC: $D = 90$ mm, $h = 4,3$ mm, $l = 131,40$ m; $D = 75$ mm, $h = 3,6$ mm, $l = 129,70$ m; $D = 63$ mm, $h = 3,0$ mm, $l = 128,70$ m;

– PE: $D = 90$ mm, $h = 5,4$ mm, $l = 123,50$ m; $D = 75$ mm, $h = 4,5$ mm, $l = 125,32$ m; $D = 63$ mm, $h = 3,8$ mm, $l = 126,75$ m.

Poszczególne średnice rur (1, 2, 3, 4, 5, 6) połączone zostały z rozdzielaczami (9, 10) poprzez zawory kulowe (8, 12). Pomiędzy rozdzielaczami zamontowano zbiornik (22) o objętości $1,0$ m³, który połączono rurą (20) doprowadzającą ciecz do rozdzielacza (10) i rurą (28) odprowadzającą ciecz z rozdzielacza (9). Na rurze (20) zamontowano pompę (19), zawór iglicowy (21), odpowietrznik (30), elektroniczny miernik przepływu PROMAG P typu 53P5-EAGBPAA0AEEA firmy Endress+Hauser (18) i elektroniczny termometr TMR31 firmy Endress+Hauser (27), natomiast na rurze (28) tylko elektroniczny termometr (31). Do pomiaru hydraulicznych strat ciśnienia (różnicy ciśnień) zastosowano elektroniczny miernik różnicy ciśnień DELTABAR S typu PMD70-ABJ7H11AAU firmy Endress+Hauser (15), który za pomocą rozdzielaczy (16, 14), końcówek impulsowych z zaworami odcinającymi (7, 13, 11, 17) i wężyków impulsowych (25) podłączono do poszczególnych badanych rur (1, 2, 3, 4, 5, 6). Do rejestracji danych pomiarowych: natężenia przepływu, różnicy ciśnień i temperatury ścieków z elektronicznych urządzeń pomiarowych, zastosowano rejestrator RSG40 firmy Endress+Hauser (24), który zapisywał je z krokiem czasowym co 1 sekunda. Elektroniczne urządzenia pomiarowe z rejestratorem połączono za pomocą kabli sterowniczych (26).

Po wypełnieniu stanowiska pomiarowego (rys. 1) ściekami i starannym odpowietrzeniu za pomocą zaworu kulowego (29) i odpowietrznika (30) uruchamiano pompę (19), która zasysała ścieki ze zbiornika (22) i tłoczyła je przez elektroniczny miernik przepływu (18), następnie przez rurę poddaną badaniu (np. 1), i z powrotem do zbiornika (22). Natężenie przepływu ścieków było ustawiane przy pomocy zaworu iglicowego (21). Przepływ ścieków w rurach zadawano z interwałem co 5 m³/h z zakresu od 40 m³/h do 5 m³/h. Podczas wykonywania pomiarów, ścieki płynęły tylko przez jedną rurę (np. 1), tę na której był otwarty zawór kulowy wlotowy (12) i wylotowy (8) na rozdzielaczach. Po ustawieniu (zadaniu) odpowiedniego przepływu ścieków i ustabilizowaniu się



Rysunek 1. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania współczynnika liniowych oporów hydraulicznych: 1,2,3 – rura z PE, 4,5,6 – rura z PVC, 7,11,13,17 – końcówka impulsowa z zaworem odcinającym, 8,12,29 – zawór kulowy, 9,10,14,16 – rozdzielacz, 15 – elektroniczny miernik różnicy ciśnień, 18 – elektroniczny miernik przepływu ścieków, 19 – pompa ściekowa, 20 – rura odprowadzając ścieki ze zbiornika, 21 – zawór iglicowy, 22 – zbiornik na ścieki, 23 – kabel elektryczny, 24 – rejestrator danych, 25 – wężyk impulsowy, 26 – kabel sterowniczy, 27,31 – termometr elektroniczny, 28 – rura doprowadzająca ścieki do zbiornika, 30 – odpowietrznik

Figure 1. Scheme of the measuring stand to determining linear losses coefficient: 1,2,3 – pipe from the PE, 4,5,6 – pipe from the PVC, 7,11,13,17 – impulse tip with cut – off valve, 8,12, 29 – ball valve, 9,10,14,16 – distributor, 15 – electronic meter of difference pressures, 18 – electronic meter of flow sewage, 19 – sewage pump, 20 – pipe carrying sewage from the tank 21 – needle valve, 22 – tank to sewage, 23 – electric cable, 24 – data logger, 25 – impulse pipe, 26 – steering cable, 27,31 – electronic thermometer, 28 – pipe supplying sewage to the tank, 30 – vent

warunków przepływu w stanowisku pomiarowym, odczytywano z urządzeń pomiarowych natężenie przepływu (18) oraz różnicę ciśnień (15), czyli hydrauliczne straty ciśnienia i temperaturę ścieków na początku i końcu badanej rury (27, 31). Następnie zmieniano natężenie przepływu ścieków i po ustabilizowaniu się warunków przepływu dokonywano kolejnego pomiaru. Po wykonaniu pomiarów na danej rurze, otwierano i zamykano odpowiednie zawory, powtarzając

pomiary w ten sam sposób dla kolejnej rury. Wykonano dla każdej średnicy rury z PVC i PE po trzy serie pomiarowe.

Dla pomierzonych par wartości natężeń przepływu cieczy Q i hydraulicznych strat ciśnienia ΔH oraz znanej średnicy wewnętrznej rurociągu d , jego długości l , z przekształconego wzoru Darcy-Weisbacha obliczano współczynniki liniowych oporów hydraulicznych λ [Grabarczyk 1997]:

$$\Delta H = \left(\sum \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4} \quad (1)$$

czyli:

$$\lambda = \frac{\Delta H \pi^2 g d^5}{8Q^2 l} \quad (2)$$

gdzie:

- ΔH – hydrauliczne straty ciśnienia [m],
- g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
- $\sum \zeta$ – suma współczynników oporów miejscowych [-],
- λ – współczynnik oporów liniowych [-],
- l – długość rurociągu [m],
- d – średnica rurociągu [m],
- Q – natężenie przepływu cieczy [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Sumę współczynników oporów miejscowych pomijano, ponieważ rurociągi w stanowisku pomiarowym (rys. 1) były ułożone w postaci pętli, która miała kształt bliski koła, a poszczególne odcinki rur łączono doczołowo bez żadnych kształtek.

Natomiast liczbę Reynoldsa Re obliczano ze wzoru [Grabarczyk 1997]:

$$Re = \frac{4Q}{\pi d \nu} \quad (3)$$

gdzie:

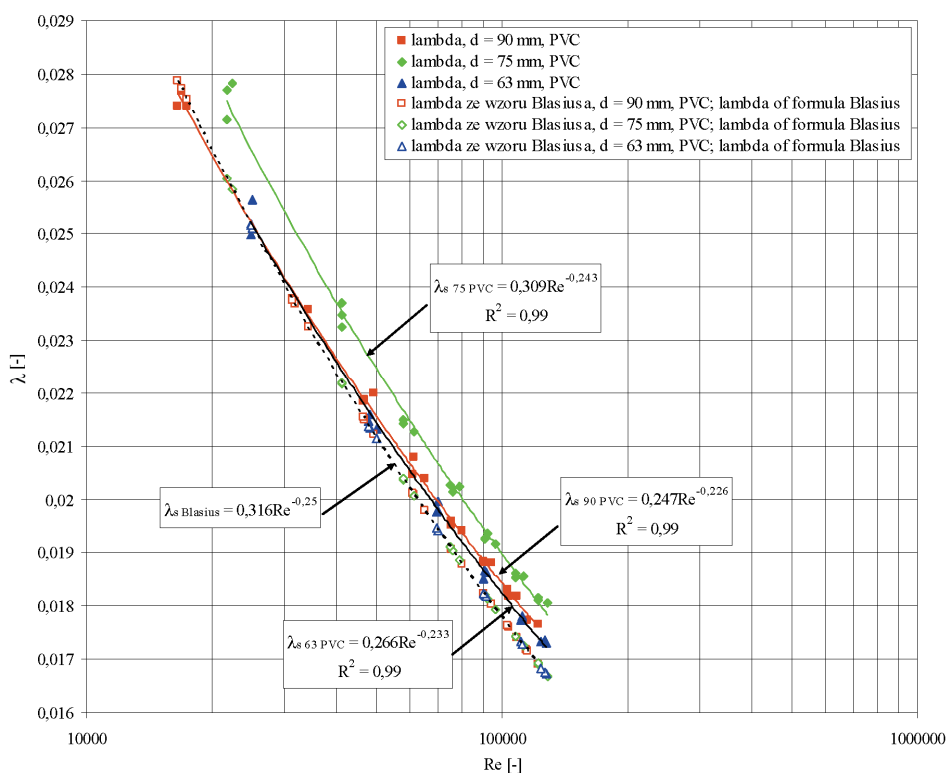
- ν – kinematyczny współczynnik lepkości cieczy [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Badania na stanowisku pomiarowym (rys. 1) były wykonywane na ściekach surowych, które pobrano na dopływie do oczyszczalni ścieków w Piasecznie. Kinematyczne współczynniki lepkości ścieków odczytano z literatury [Grabarczyk 1997] dla pomierzonego w pobranych ściekach stężenia zawiesiny ogólnej, które wyniosło $450 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Otrzymane pary wartości λ i Re naniesiono na wykresy (rys. 2 i 3) i przeprowadzono analizę (wnioskowanie) statystyczną.

WYNIKI I DYSKUSJA

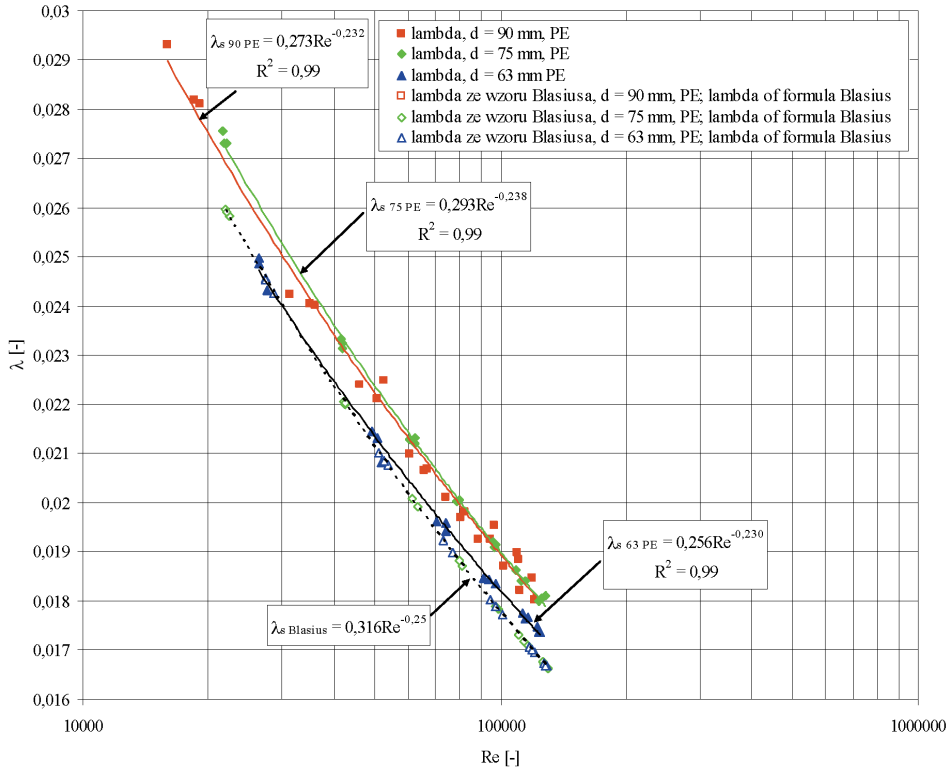
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki, wyznaczonych z badań eksperymentalnych współczynników liniowych oporów hydraulicznych λ w funkcji liczby Reynoldsa Re dla ścieków w rurach z PVC i PE.

Dla (rys. 2 i 3) punktów wyznaczonych z badań eksperymentalnych, zastosowano metodę najmniejszych kwadratów [Bobrowski i Maćkowiak-Łybacka 2006, Oktawa 1977] i wyznaczono aproksymacyjne równania empiryczne, czyli λ_s - współczynniki liniowych oporów hydraulicznych dla ścieków, które umieszczono na rysunkach razem z wyznaczonym współczynnikiem determinacji R^2 [Szydłowski 1981] dla korelacji krzywoliniowej.



Rysunek 2. Zestawienie wyników obliczeń współczynników λ dla rur ciśnieniowych z PVC

Figure 2. Results of calculations of the coefficients λ for pressure pipes of PVC



Rysunek 3. Zestawienie wyników obliczeń współczynników λ dla rur ciśnieniowych z PE

Figure 3. Results of calculations of the coefficients λ for pressure pipes of PE

Współczynnik determinacji R^2 przyjmuje wartości w przedziale $0 < R^2 < 1$, a jego duże wartości świadczą o dobrym dopasowaniu krzywej empirycznej do wyników eksperymentalnych. Wyniki obliczeń dla ścieków, przedstawione na rysunkach 2 i 3, ze względu na bardzo wysoką wartość współczynnika R^2 , w bardzo dobrym stopniu aproksymowane są przedstawionymi wzorami empirycznymi do obliczania współczynników λ_s . Można stwierdzić, że dokładność aproksymacji wyników eksperymentalnych przedstawionymi wzorami empirycznymi wynosi 99 %. Oznacza to, że współczynnik λ_s w 99 % zależy tylko od liczby Re , i ta zależność opisywana jest przedstawionymi wzorami empirycznymi, natomiast w pozostałym 1 % zależy od innych czynników, między innymi od chropowatości wewnętrznych ścian rury.

Oznacza to, że przepływ ścieków w rurach z PVC i PE może być obliczany z pominięciem współczynnika chropowatości bezwzględnej k , jako przepływ

w rurach hydraulicznie gładkich. Należy również zauważyć, że wyznaczone wzory empiryczne mają taką samą budowę jak wzór Blasiusa dla przepływu wody w rurach hydraulicznie gładkich [Grabarczyk 1997]:

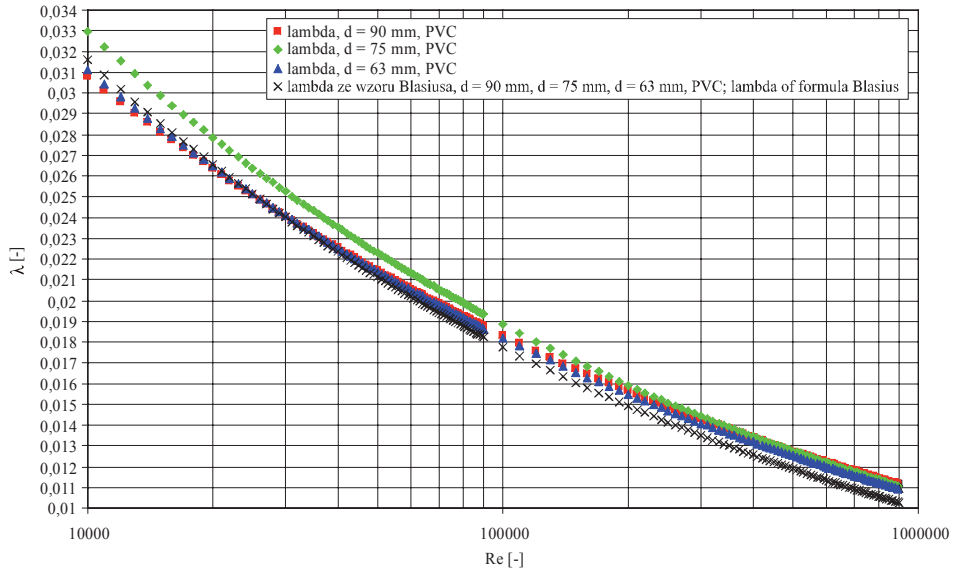
$$\lambda = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \quad (4)$$

Wzór ten jest aproksymacją wzoru Prandtla-Karmana, który jest szczególnym przypadkiem wzoru Colebrooka-Whitea dla przepływu w rurach hydraulicznie gładkich, tzn. dla chropowatości bezwzględnej $\varepsilon = k/d = 0$. Należy zauważyć, że aproksymacyjne wzory empiryczne, przedstawione na rysunku 2 i 3, różnią się od wzoru (4) tylko niewielką różnicą wartości obu współczynników liczbowych.

Na rysunkach 2 i 3 zamieszczono również wyniki obliczeń współczynników liniowych oporów hydraulicznych w badanych rurach dla ścieków $\lambda_{sBlasius}$ (4) przy wykorzystaniu wzoru Blasiusa. Do tego wzoru podstawiano te same wartości liczby Re , które wyznaczono z przeprowadzonych badań eksperymentalnych, dla występujących przepływów ścieków, przy których wyznaczano współczynniki liniowych oporów hydraulicznych λ_s .

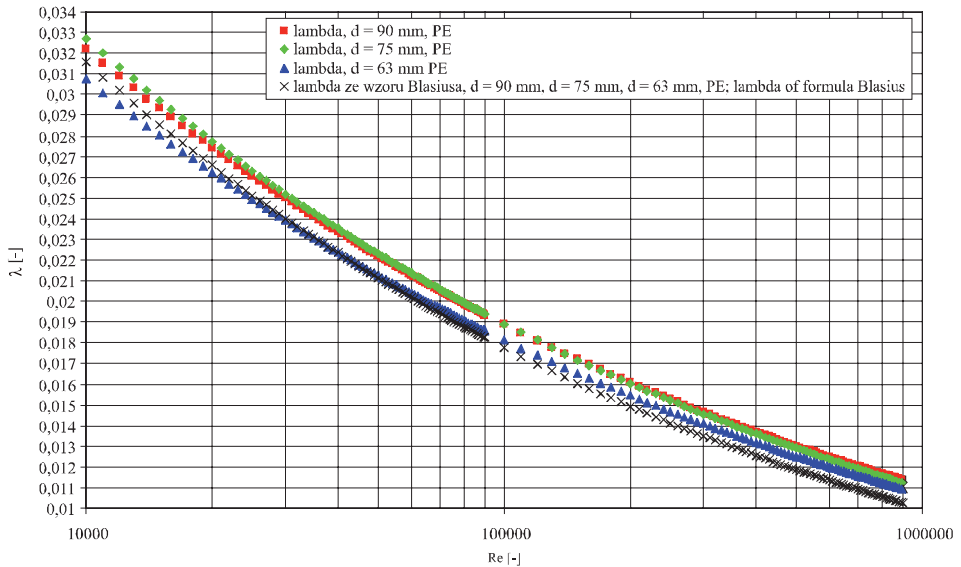
Otrzymane wyniki obliczeń współczynników λ ze wzoru Blasiusa dla ścieków, ułożyły się w jednej linii - $\lambda_{sBlasius}$ (rys. 2 i 3), tworząc taki sam trend dla rur PVC i PE. Potwierdza to, że rury z PVC i PE, są rurami hydraulicznie gładkimi, a tłoczone ścieki nie spowodowały zmian szorstkości (chropowatości) rur.

Na rysunkach 4 i 5 zestawiono wyniki obliczeń współczynników λ_s obliczonych za pomocą wyznaczonych wzorów empirycznych (rys. 2 i 3) oraz współczynniki $\lambda_{sBlasius}$ wyznaczonych ze wzoru Blasiusa (4). W celu porównania współczynników obliczonych z wyznaczonych wzorów empirycznych λ_s ze współczynnikami obliczonymi ze wzoru $\lambda_{sBlasius}$ przyjęto do obliczeń współczynników λ_s i $\lambda_{sBlasius}$ jednakowe wartości liczby Reynoldsa Re z przedziału od $9,0 \cdot 10^5$ do $1,0 \cdot 10^4$. Czyli przykładowo: wartość $Re = 8,0 \cdot 10^4$ wstawiano do wzorów wyznaczonych empirycznie podanych na rysunkach 2 i 3 oraz do wzoru Blasiusa (4) dla której otrzymywano współczynniki λ_s i $\lambda_{sBlasius}$ (rys. 4 i 5). Również na rysunkach 4 i 5 zaznaczono przedział zalecanych do projektowania prędkości przepływu ścieków: minimalnej $v = 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [PN-EN 1671 2001] i maksymalnej $v = 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [Kalenik 2011].



Rysunek 4. Zestawienie wyników obliczeń współczynników λ dla rur ciśnieniowych z PVC wyznaczonymi wzorami empirycznymi

Figure 4. Results of calculations of the coefficients λ for pressure pipes of PVC with determined empirical formulas



Rysunek 5. Zestawienie wyników obliczeń współczynników λ dla rur ciśnieniowych z PE wyznaczonymi wzorami empirycznymi

Figure 5. Results of calculations of the coefficients λ for pressure pipes of PE with determined empirical formulas

Na podstawie rysunków 4 i 5 obliczono o ile procent różnią się współczynniki λ_s względem współczynników $\lambda_{sBlasius}$. Do obliczeń różnic procentowych wartości współczynników λ z przedziału zalecanej prędkości przepływu ścieków v , zastosowano formułę:

$$\left(\frac{\lambda_s - \lambda_{sBlasius}}{\lambda_s} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Następnie dla otrzymanych różnic procentowych wartości współczynników λ z przedziału zalecanej prędkości przepływu ścieków v (5) obliczono średnie arytmetyczne. W związku z tym, porównując współczynniki λ_s i $\lambda_{sBlasius}$ można stwierdzić, że współczynniki λ_s przyjmują większe wartości od $\lambda_{sBlasius}$ w rurach z PVC średnio o: 2 % w $d = 90$ mm, 5 % w $d = 75$ mm, 1 % w $d = 63$ mm, natomiast w rurach z PE o: 5 % w $d = 90$ mm, 5 % w $d = 75$ mm, 1 % w $d = 63$ mm.

PODSUMOWANIE

Współczynniki liniowych oporów hydraulicznych λ_s wyznaczone z badań eksperymentalnych w rurach z PVC i PE przyjmują względem siebie porównywalne wartości, które w przedziale zalecanej prędkości przepływu ścieków v są większe od wartości $\lambda_{sBlasius}$ obliczonych ze wzoru Blasiusa.

Jak wiadomo wzór Blasiusa (4) do obliczania współczynników λ odnosi się do wody. W związku z tym, większe wartości współczynników λ_s od $\lambda_{sBlasius}$ być może wynikają z faktu, że mamy do czynienia ze ściekami. Oczywiście jest to hipoteza, która podczas dalszych badań na ściekach będzie zweryfikowana.

Przeprowadzone badania pokazują, że przepływ ścieków w rurach z PVC i PE ma charakter przepływu w rurach hydraulicznie gładkich, ponieważ chropowatość względna ε nie ma wpływu na opory hydrauliczne.

Otrzymane średnie procentowe różnice pomiędzy współczynnikami λ_s i $\lambda_{sBlasius}$, uzasadniają celowość stosowania wyznaczonych aproksymacyjnych wzorów empirycznych $\lambda_s(Re)$ dla badanych rur o średnicach: 90, 75, 63 mm z PVC - rysunek 2 oraz z PE - rysunek 3.

Duża wartość poznawcza i użytkowa otrzymanych wyników badań, wskazuje na konieczność kontynuacji badań dla większych zawartości zawiesiny ogólnej w ściekach.

BIBLIOGRAFIA

- Bobrowski D., Maćkowiak-Lybacka K. *Wybrane metody wnioskowania statycznego*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2006, s. 250.
- Grabarczyk Cz. *Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe*. Envirotech. Poznań 1997, s. 367.
- Grabarczyk Cz., Kalenik M., Siwiec T., Morawski D. *Eksperymentalne badania liniowych oporów hydraulicznych ciśnieniowych przepływów ścieków w rurach PVC i PE - Gamrat*. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Budownictwo, nr 40/2001a, s. 29-37.
- Grabarczyk Cz., Siwiec T., Kalenik M., Morawski D. *Opory hydrauliczne w kanalizacji ciśnieniowej*. Rynek Instalacyjny, nr 1/2/2001b, s. 6-9.
- Kalenik M. *Niekonwencjonalne systemy kanalizacji*. Wydawnictwo SGGW, Wydanie drugie poprawione. Warszawa 2011, s. 90.
- Katalog firmy KAMRAT. Jasło 2000, s. 190.
- Oktawa W. *Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa*. PWN. Warszawa 1977, s. 310.
- PN-EN 1671. *Zewnętrzne systemy kanalizacji ciśnieniowej*. PKN. Warszawa 2001, s. 25.
- Siwiec T., Kalenik M., Morawski D., Majka B. *Modyfikacja metody obliczania oporów hydraulicznych ciśnieniowego przepływu ścieków*. Informacja INSTAL, nr 11/2001, s. 23-26.
- Szabo T. *Kanalizacja ciśnieniowa „Presskan”*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 4-5/1990, s. 76-80.
- Szydłowski H. *Teoria pomiarów*. PWN. Warszawa 1981, s. 441

Dr inż. Piotr Wichowski
e-mail: piotr_wichowski@sggw.pl

Dr inż. Marek Kalenik
e-mail: marek_kalenik@sggw.pl

Dr hab. inż. Tadeusz Siwiec
e-mail: tadeusz_siwiec@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*