

PRACE ORYGINALNE

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 4 (50), 2010: 3–13

(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 4 (50), 2010)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 4 (50), 2010: 3–13

(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 4 (50), 2010)

Piotr SIWICKI¹, Bartosz SZELĄG²

¹Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW w Warszawie

Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WULS – SGGW

²Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

Chair of Geotechnics and Water Engineering

Zastosowania modelu CFD FLUENT do określania strat hydraulicznych w kołowych przewodach wodociągowych ze światłowodem

Application of CFD FLUENT model to determine the hydraulic losses in the circular pipe with fiber optic cables

Słowa kluczowe: przewód kołowy, straty hydrauliczne

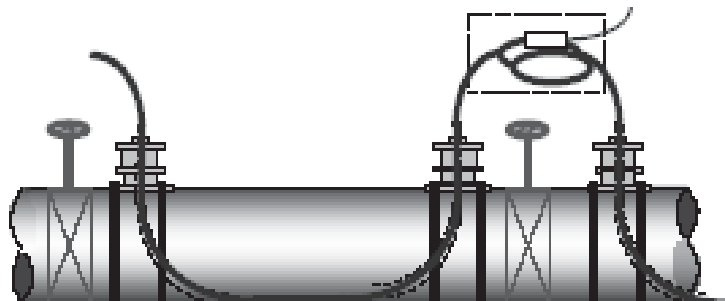
Key words: circular pipe, hydraulic losses

Wprowadzenie

Pierwsze wykorzystanie podziemnych przewodów do wielu celów miało miejsce w Paryżu w 1898 roku. W tym samym czasie władze miasta Vancouver w Kanadzie i Chicago w USA zezwoliły na instalację kabli telefonicznych w rurociągach z wodą pitną. Jednak ze względu na problemy powstające w trakcie ich eksploatacji (m.in. korozja, zanieczyszczenia) próby te zostały przerwane. Pomysł na wykorzystanie istniejących rurociągów transportujących ciecz ponownie powrócił w latach dziewięćdzie-

siątych. W 1983 roku J.K. Jeyapalan ze współpracownikami zaprojektowali dwa wysokociśnieniowe rurociągi o średnicy 2144 mm, podwieszane do sklepienia tuneli wylotowych o średnicy 6400 mm w zaporach wodnych Jennings, Randolph i Gathright (Jeyapalan 2007). Od tego czasu nastąpił rozwój technologii układania kabli w istniejących kanałach przełazowych i nieprzełazowych kanalizacji sanitarnej i deszczowej.

Jedną z najbardziej rozbudowanych sieci infrastruktury podziemnej jest sieć wodociągowa. Do większości budynków i obiektów użyteczności woda jest dostarczana za pomocą przyłączy wodociągowych, które pozwalają rozbudować istniejący system dystrybucji wody. Firma Alcatel zaproponowała wykorzystanie rozbudowanej struktury podziemnej



RYSUNEK 1. Technologia układania kabla światłowodowego w przewodzie wodociągowym (Jeyapalan 2007)

FIGURE 1. Technology laying fiber-optic cable in the water supply pipe (Jeyapalan 2007)

sieci wodociągowej do instalacji kabli światłowodowych (Jeyapalan 2007). Punktem wejścia kabla światłowodowego na przewodzie wodociągowym jest kołnierz oraz uszczelniona tuleja wlotowa (rys. 1). Instalacja kołnierza odbywa się na rurociągu w normalnych warunkach roboczych, natomiast przepływ wody jest przerywany na moment wprowadzenia kabla. Instalacja jego odbywa się za pomocą linki. Jest ona wprowadzana do kołnierza i dalej sama dopływa do kolejnego kołnierza. Następnie linka łączona jest z kablem i wciągana ręcznie do rury.

W rurociągach wody pitnej długość sekcji między kołnierzami, w których ciągnięty jest kabel, dochodzi do 250 m. Wadą powyższego rozwiązania jest fakt, iż w obrębie kabla światłowodowego nie ma możliwości lokalizowania dodatkowych włókien optycznych. W celu wyeliminowania tej wady powstały technologie, umożliwiające rozbudowę sieci światłowodowych o nowe włókna. W przewodach pod powłoką „renowacyjną”/ochronną umieszczana jest rura osłonowa, w której lokalizowane są kolejne włókna światłowodowe (rys. 2).

Celem artykułu jest zastosowanie modelu CFD FLUENT do obliczania strat hydraulicznych, spadku ciśnienia na długości przewodu kołowego i wykorzystanie go do rozpoznania i analizy warunków hydraulicznych przewodu wodociągowego z kablem światłowodowym umieszczonym w sklepieniu przewodu pod powłoką „renowacyjną” i bez powłoki. Analizie poddano spadki ciśnienia na długości analizowanych przewodów obliczone także z wykorzystaniem zależności Colebrooka-White’a.



RYSUNEK 2. Metoda montowania kabla światłowodowego w rurze osłonowej pod powłoką (Jeyapalan 2007)

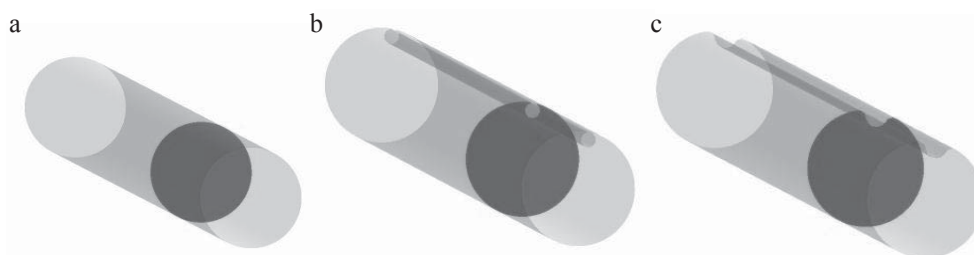
FIGURE 2. Method installation of the fiber optic cable in the in the shell extensions (Jeyapalan 2007)

Metodyka i zakres obliczeń

Obliczenia numeryczne strat energii/ciśnienia w przewodach o różnym kształcie przekroju poprzecznego (rys. 3) wykonano za pomocą programu obliczeniowego (FLUENT 12.1. 2010) firmy ANSYS. Program ten wykorzystuje metodę objętości skończonych do rozwiązywania trójwymiarowych równań zachowania masy, pędu i energii. W związku z występowaniem ruchu turbulentnego do opisu strat energii w pakiecie FLUENT przyjęto model $k-\epsilon$ do obliczeń współczynnika lepkości wirowej i rozkładu prędkości. Model pozwala uwzględnić wpływ chropowatości ścian-

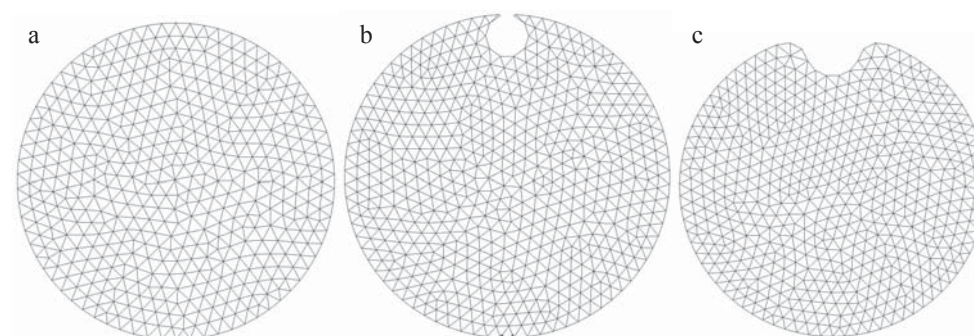
ki przewodu na wielkości strat ciśnienia. Schemat dyskretyzacji przekroju strumienia przedstawiono na rysunku 4. Dla przewodu kołowego długości 8 m siatka obliczeniowa składała się z 191 277 węzłów, dla przewodu kołowego ze światłowodem bez powłoki renowacyjnej – z 239 397 węzłów, a dla przewodu kołowego ze światłowodem w powłoce renowacyjnej – z 236189 węzłów. Obliczone wartości współczynników oporów programem FLUENT porównano z wartościami współczynnika oporów liniowych obliczonych wzorem Colebrooka-White'a.

Jednostkowy spadek energii/ciśnienia cieczy na długości przewodu, uza-



RYSUNEK 3. Analizowane przewody: a – przewód kołowy, b – przewód kołowy ze światłowodem bez powłoki renowacyjnej, c – przewód kołowy ze światłowodem w powłoce renowacyjnej

FIGURE 3. Analyzed pipes: a – circular pipe, b – circular pipe with fiber optic cable, c – circular pipe with optical fibers in the shell extensions



RYSUNEK 4. Schematy dyskretyzacji modeli: a – przewód kołowy, b – przewód kołowy ze światłowodem bez powłoki renowacyjnej, c – przewód kołowy ze światłowodem w powłoce renowacyjnej

FIGURE 4. Schemats of mesh: a – circular pipe, b – circular pipe with fiber optic cable, c – circular pipe with optical fibers in the shell extensions

leżniony od rodzaju ruchu cieczy (laminarny, przejściowy i burzliwy), przekroju poprzecznego i chropowatości ścian, opisany jest wzorem:

$$I = \frac{\Delta h}{L} = \lambda \frac{v_{sr}^2}{2gD} \quad (1)$$

gdzie:

I – spadek linii energii ciśnienia [–],

Δh – wysokość strat liniowych energii [m],

L – długość analizowanego odcinka przewodu [m],

λ – współczynnik oporów liniowych [–],

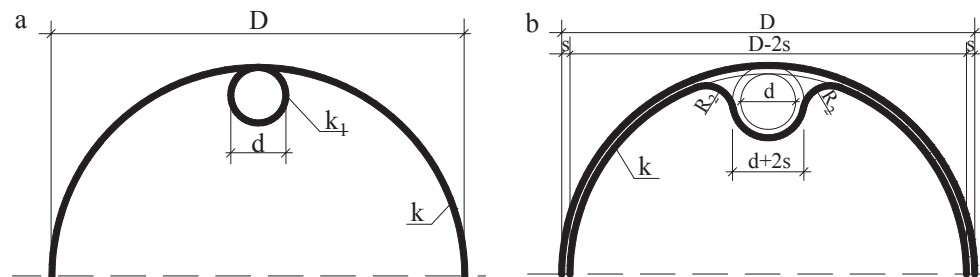
v_{sr} – prędkość przepływu [$m \cdot s^{-1}$], wyrażona jako $v_{sr} = (4Q)/(\pi D^2)$,

g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],

D – średnica wewnętrzna rurociągu [m].

Wyznaczenie wartości współczynników oporów liniowych (λ) było celem badań między innymi: Zigranga-Sylvestera (Grabarczyk 1997), Phama (Grabarczyk 1997), Chena (1979), Churchilla (1977), Colebrooka-White’a (Idelchik 1994). Według ostatnich, wartość współczynnika wyrażona jest zależnością (Idelchik 1994):

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



RYSUNEK 5. Przekrój przewodów z oznaczeniami: a – przewód kołowy ze światłowodem bez powłoki renowacyjnej, b – przewód kołowy ze światłowodem w powłoce renowacyjnej

FIGURE 5. Cross-section with marks: a – circular pipe with fiber optic cable, b – circular pipe with optical fibers in the shell extensions

gdzie:

ϵ – chropowatość względna, określana jako stosunek chropowatości absolutnej (k) do średnicy wewnętrznej przewodu (D) [–],

Re – liczba Reynoldsa obliczana z równania $Re = \frac{v_{sr} D}{\nu}$ [–],

ν – współczynnik lepkości kinematycznej [$m^2 \cdot s^{-1}$], przy temperaturze wody równej $10^\circ C$ wynosi $\nu = 1,03 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$.

Ponieważ analizowane przekroje strumienia (rys. 5) nie są kołowe, więc do obliczeń wprowadzono promień hydrauliczny (R_h). Zależność między promieniem hydraulicznym a średnicą wewnętrzną przewodu kołowego jest następująca:

$R_h = \frac{D}{4}$ (3)

Uwzględniając równanie (3) i wyrażenie na średnią prędkość przepływu (v_{sr}) w równaniu (1), można obliczyć spadek ciśnienia na długości kołowego przewodu z zależności:

$$\Delta h = \lambda \frac{Q^2 L}{128 \pi^2 g R_h^5} \quad (4)$$

gdzie Q – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Promień hydrauliczny przekroju przewodu (rys. 5a) określono jako $R_h = (D - d)/4$, a dla przekroju rurociągu (rys. 5b) jako:

$$R_h = \frac{A_z}{O_z} \quad (5)$$

gdzie:

A_z – pole powierzchni przekroju strumienia; ze względu na jego złożoną geometrię wyznaczone zostało za pomocą programu AutoCAD 2004; dla średnicy wewnętrznej przewodu $D = 0,15$ m wyznaczono $A_z = 0,0156$ m^2 ,

O_z – obwód zwilżony obliczony według wzoru:

$$O_z = 0,5\pi(D - 2s) + 2l_1 + 2l_2 + l_3 \quad (6)$$

s – grubość powłoki wkładki, $s = 0,003$ m, l_1, l_2, l_3 – cząstkowe obwody zwilżone (rys. 6b), obliczane ze wzorów:

$$l_1 = \frac{68}{180}\pi \frac{(D - 2s)}{2} \quad (7a)$$

$$l_2 = \frac{160}{180}\pi \frac{(d + 2s)}{2} \quad (7b)$$

$$l_3 = \frac{105}{180}\pi R_2 \quad (7c)$$

R_2 – promień okręgu stycznego do rurociągów o średnicach: $D - 2s$ i $d + 2s$ (rys. 6a), $R_2 = 0,01$ m.

W celu obliczenia współczynnika oporów liniowych ze wzoru Colebrooka-White'a dla analizowanego przewodu konieczne jest uwzględnienie chropowatości absolutnej zarówno przewodu wodociągowego, jak i kabla światłowodowego. Dlatego też do obliczeń wprowadzono chropowatość zastępczą (k_z) obliczaną z zależności (Dąbrowski 2004):

$$k_z = O_1 k_1 + O k \quad (8)$$

gdzie:

k_z – zastępcza chropowatość przekroju [m],

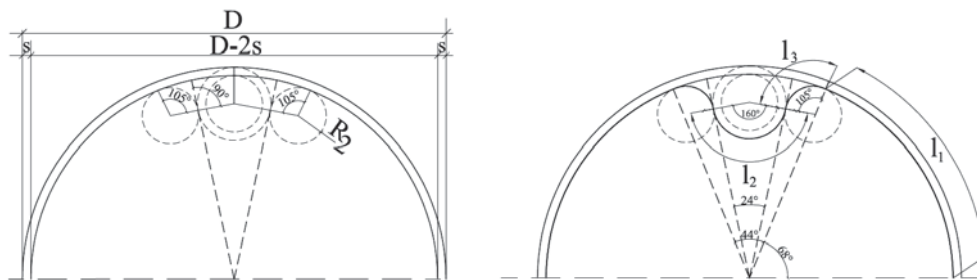
k_1 – chropowatość ścian kabla światłowodowego [m],

k – chropowatość ścian przewodu [m],

O, O_1 – procentowe udziały obwodu zwilżonego, do których przypisane zostały chropowatości k i k_1 .

Wartości liczby Reynoldsa (Re) dla analizowanego przewodu (rys. 5) obliczono w funkcji natężenia przepływu (Q) ze wzoru:

$$Re = \frac{4R_h v_{sr}}{\nu} \quad (9)$$



RYSUNEK 6. Geometria przewodu kołowego z wkładką renowacyjną

FIGURE 6. Geometry of circular pipe with optical fibers in the shell extensions

Do oceny zgodności wartości obliczonych z modelu numerycznego z obliczeniami według wzoru Colebrooka-White'a zastosowano trzy najczęściej stosowane w praktyce miary statystyczne (Błazejewski 1999):

- względny średniokwadratowy błąd resztowy

$$WBR = \frac{1}{y_p} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{m,i})^2} \quad (10)$$

gdzie:

$y_{p,i}$ – wartości z pomiarów,
 $y_{m,i}$ – wartości obliczone modelem,
 n – liczba pomiarów.

- stosunek wartości średnich

$$SWS = \frac{\overline{y_m}}{\overline{y_p}} \quad (11)$$

gdzie $\overline{y_m}, \overline{y_p}$ – średnia arytmetyczna odpowiednio wartości obliczonych modelem (m) i z pomiarów (p),

- współczynnik korelacji (R)

$$R = \frac{\overline{y_p y_m} - \overline{y_p} \overline{y_m}}{\sigma_p \sigma_m} \quad (12)$$

gdzie:

$\overline{y_p y_m}$ – średnia arytmetyczna iloczynów wielkości obliczonych z pomiarów (p) i modelem (m),

$\overline{y_p}, \overline{y_m}$ – średnia arytmetyczna wartości obliczonych modelem FLUENT (m) i z pomiarów (p),

σ_m, σ_p – odchylenie standardowe wartości obliczonych modelem FLUENT (m) i z pomiarów (p),

Wyniki obliczeń

W celu weryfikacji modelu CFD wykonano obliczenia spadku ciśnienia na długości przewodu o średnicy wewnętrznej $D = 150$ mm, o chropowatości $k = 0,4$ mm i $1,5$ mm. W przypadku analizy strat w przewodzie ze światłowodem umieszczonym pod powłoką i bez powłoki (rys. 3) rozważano przekrój rurociągu o średnicy wewnętrznej 150 mm i chropowatości powłoki $k = 0,4$ i $1,5$ mm. W obliczeniach zakładano zmienność natężenia przepływu w przewodach od 9 do $40 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości liczby Reynoldsa i obliczone współczynniki oporów liniowych według zależności Colebrooka-White'a zamieszczono w tabeli 1. Wzrost strat energii w wyniku wstawienia wkładki renowacyjnej przy obliczaniu współczynników oporu wynosi w stosunku do przewodu kołowego około 40% , a w przypadku wstawienia światłowodu – około 17% .

Warunki hydrauliczne kształtowały się w strefie ruchu turbulentnego. Według nomogramu, do wyznaczania współczynnika oporów liniowych (rys. 7) dla szorstkości $k = 0,4$ mm pod względem chropowatości jest to strefa przepływów przejściowych, a dla $k = 1,5$ mm strefa przepływu hydraulicznie szorstkiego.

Kalibrację modelu CFD FLUENT wykonano dla przewodu kołowego. W przedziale badanych przepływów porównano wartości statystycznych miar jakości dla strat energii z modelu z wartościami uzyskanymi z obliczeń wzorem Colebrooka-White'a (2). Uzyskano „znakomitą” zgodność dla wszystkich miar (tab. 2).

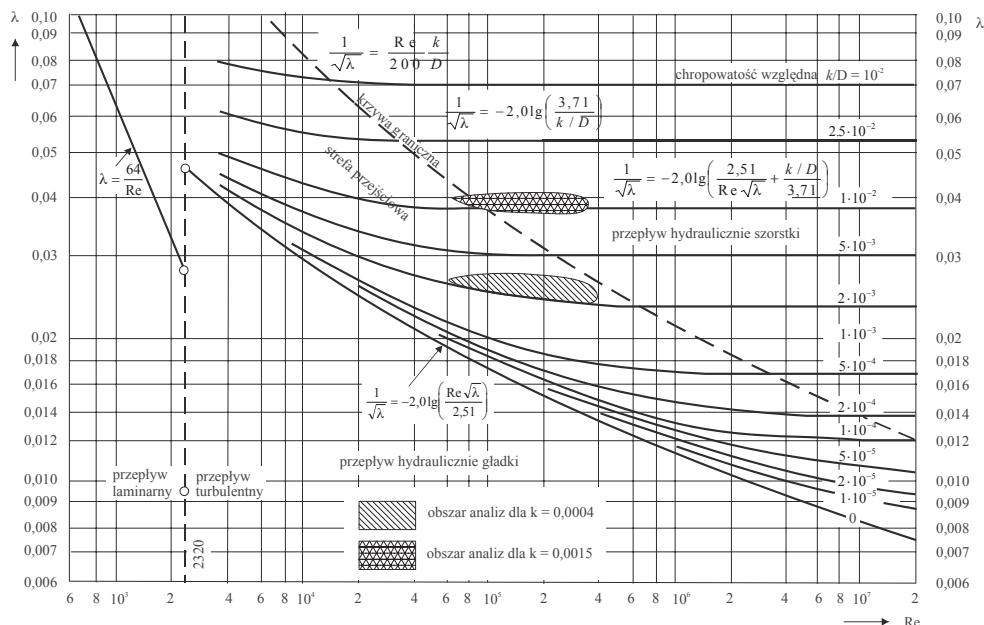
TABELA 1. Warunki przepływu w analizowanych przewodach o różnym kształcie przekroju poprzecznego
 TABLE 1. Flow condition in cable for different shapes of cross section

Q	Przewód kołowy Circular pipe			Przewód ze światłowodem bez wkładki Pipe with fiber optic cable			Przewód kołowy z powłoką renowacyjną Pipe with optical fibers in the shell extensi		
	λ			λ			λ		
	k = 0,4 mm	k = 1,5 mm	Re [-]	k = 0,4 mm	k = 1,5 mm	Re [-]	k = 0,4 mm	k = 1,5 mm	Re [-]
0,0177	0,0263	0,0383	145 610	0,0273	0,0403	128 480	0,0274	0,0406	140 598
0,0221	0,0261	0,0382	182 054	0,0272	0,0403	160 636	0,0272	0,0402	175 787
0,0265	0,0260	0,0382	218 498	0,0271	0,0402	192 792	0,0270	0,0401	210 976
0,0309	0,0259	0,0381	254 901	0,0270	0,0402	224 912	0,0269	0,0401	246 126
0,0353	0,0258	0,0381	291 303	0,0269	0,0402	257 032	0,0269	0,0400	281 275
0,0398	0,0258	0,0381	327 783	0,0269	0,0401	289 220	0,0268	0,0399	316 499
0,0442	0,0257	0,0380	364 262	0,0268	0,0401	321 408	0,0268	0,0400	351 723

TABELA 2. Zestawienie i ocena statystycznych miar jakości modelu numerycznego dla analizowanych strat energii w przekrojach poprzecznych przewodu

TABLE 2. Overview and assessment of statistical standard the quality of the numerical model for analyzed cross section shapes of the cable

Typ przewodu Type of pipe	R [-]	SWS [-]	WBR [-]	R [-]	SWS [-]	WBR [-]
Przewód kołowy Circular pipe	1,000	1,002	0,002	znakomity	znakomity	znakomity
Przewód kołowy z powłoką renowacyjną Pipe with optical fibers in the shell extensions	0,995	0,866	0,161	bardzo dobry	dość dobry	dość dobry
Przewód ze światłowodem bez wkładki renowacyjnej Pipe with fiber optic cable	0,952	1,089	0,143	bardzo dobry	dobry	dość dobry



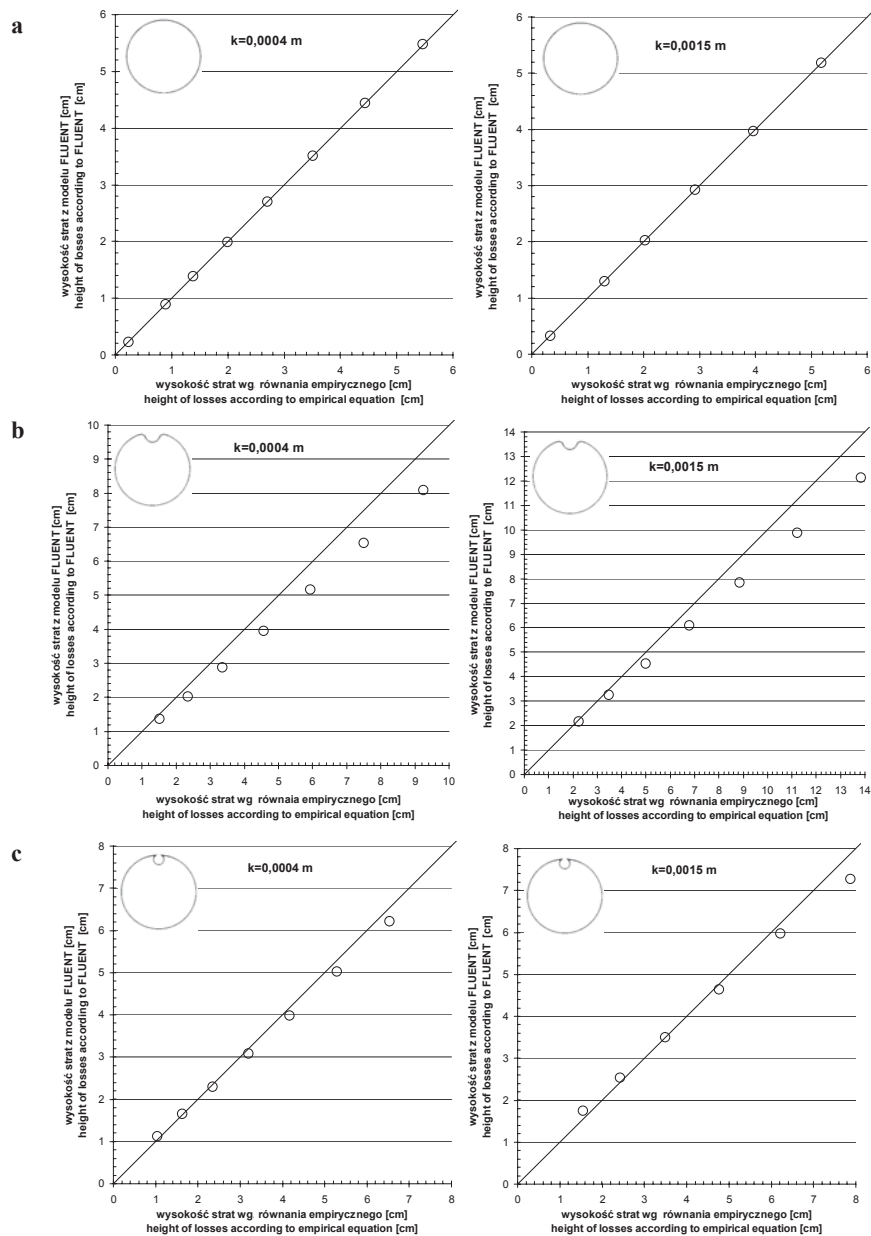
RYSUNEK 7. Warunki hydrauliczne w analizowanych przekrojach porządkowych przewodów
 FIGURE 7. Hydraulic conditions in analyzed cross sections of the cable

Obliczone wartości strat energii z modelu numerycznego porównane z obliczonymi wzorem empirycznym zobrazowano na rysunku 8a. Zakładając, że przyjęty model numeryczny dobrze odwzorowuje warunki hydrauliczne w przewodzie kołowym, wykonano obliczenia strat dla przewodu z powłoką renowacyjną z zastosowaniem takiej samej struktury i gęstości siatki obliczeniowej, jak dla wcześniejszych obliczeń przewodu kołowego. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wartościami strat obliczonymi według wzoru empirycznego (4), uwzględniając zmianę przekroju poprzecznego według przedstawionej metodyki na rysunku 8b. Porównane wyniki obliczeń wykazują mniejszą zgodność z modelem CFD FLUENT. Obliczone wzorem empirycznym wielkości strat są

większe niż obliczone modelem numerycznym. Pogorszeniu uległy miary jakości modelu przedstawione w tabeli 2.

Kolejnym analizowanym przypadkiem był przewód kołowy ze światłowodem bez powłoki renowacyjnej. Zastosowano tę samą metodykę obliczeniową modelem numerycznym i wzorem empirycznym, jak w przypadku przewodu z wkładką renowacyjną, uwzględniając w obu przypadkach zmianę przekroju poprzecznego przewodu. Porównanie uzyskanych wyników obliczeń oboma metodami zobrazowano na rysunku 8c. Uzyskano gorsze miary jakości modelu (tab. 2) niż obliczone dla przewodu kołowego.

Zastosowana metoda obliczenia strat energii w przewodzie ze światłowodem lub wkładką, uwzględniająca jedynie



RYSUNEK 8. Porównanie wielkości strat z modelu numerycznego ze stratami obliczonymi wzorem empirycznym dla: a – przewodu kołowego, b – przewodu kołowego ze światłowodem w powłoce renowacyjnej, c – przewodu kołowego ze światłowodem bez powłoki renowacyjnej

FIGURE 8. Comparison of the height of losses from the numerical model with the losses calculated according to empirical equation for different shapes of cross section and roughness of the cable: a – circular pipe, b – circular pipe with optical fibers in the shell extensions, c – circular pipe with fiber optic cable



RYSUNEK 9. Przykładowy rozkład prędkości w: a – przewodzie kołowym, b – przewodzie kołowym ze światłowodem w powłoce renowacyjnej, c – przewodzie kołowym ze światłowodem bez powłoki renowacyjnej

FFIGURE 9. Sample of velocity distribution in: a – circular pipe, b – circular pipe with optical fibers in the shell extensions, c – circular pipe with fiber optic cable

zmiennosc promienia hydraulicznego (R_h) w stosunku do przewodu kołowego, wydaje się niewłaściwa. Nie uwzględnia ona zmian w strukturze przepływu w następstwie zmiany przekroju poprzecznego przewodu (rys. 9). Z tego względu wyniki z modelu CFD FLUENT są bardziej wiarygodne, lecz należałoby fakt ten potwierdzić badaniami na modelach fizycznych.

Podsumowanie

Straty energii w wyniku wstawienia wkładki renowacyjnej przy obliczaniu współczynników oporu są w stosunku do przewodu kołowego większe o 40%, a w przypadku wstawienia światłowodu – o 17% (tab. 1). Wykorzystanie wzorów empirycznych dla przewodów kołowych do określania strat hydraulicznych w przewodach z wkładką światłowodową lub samym światłowodem, z uwzględnieniem jedynie zmiany promienia hydraulicznego, zaniża wielkości strat. Jedną z przyczyn rozbieżności jest zmiana struktury rozkładu prędkości w polu

przepływu dla analizowanych przewodów w stosunku do przewodu kołowego. Przeprowadzone analizy modelem CFD FLUENT należałoby poddać weryfikacji na modelach fizycznych.

Literatura

- BLAŻEJEWSKI R. 1999: Wstęp do badań empirycznych. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. A. Cieszkowskiego, Poznań.
- CHEN N.H. 1979: An explicit equation for friction factor in pipe. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 18, 3: 296–297.
- CHURCHILL S.W. 1977: Friction factor equations spans all fluid – ranges. *Chemical Engineering* 91.
- DĄBROWSKI W. 2004: Oddziaływanie sieci kanalizacyjnych na środowisko. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- FLUENT 12.1. 2010: User' Guide Fluent Inc.
- GRABARCZYK C. 1997: Przepływ ciecży w przewodach. Wydawnictwo Enviroter, Poznań.
- GUO J., YULIEN P.Y. 2007: Buffer law and transitional roughness effect in turbulent open – channel flow. The Fifth International Symposium on Environmental Hydraulics, 4–7 December, Arizona.
- IDELČHIK 1994: Handbook of Hydraulics Resistance. CRC Press.

- JEYAPALAN J.K. 2007: The Pipe is There: Using Existing Infrastructure to Speed FTTH Deployment. *Broadband Properties*: 61–70.
- OZGER M., YILDIRIM G. 2009: Determining turbulent flow friction coefficient using adaptive neuro – fuzzy computing technique. *Advance in Engineering Software* 40: 281–287.
- PATTANAPOL W., WAKES S.W., HILTON M.J., DICKINSON K.J.M. 2007: Modeling on Surface Roughness for Flow over a Complex Vegetated Surface. *World Academy of Science. Engineering and Technology* 32: 273–281.
- ROMEO E., ROYO C., MONZON A. 2002: Improved explicit equation of the friction factor in rough and smooth pipe. *Chemical Engineering Journal* 86: 369–374.
- REGEL W. 2004: Mathcad przykłady zastosowań. MIKOM, Warszawa.

Summary

Application of CFD Fluent model to determine the hydraulic losses in the circular pipe with fiber optic cables. The paper presents verification results of the empirical formulas for calculating the hydraulic losses in the circular pipes to the calculation losses in circular pipe with optical fibers in the shell

extensions and circular pipe with fiber optic cable. Verification was made using the CFD numerical model. The use of empirical formulas for determining the hydraulic losses in the circular pipe with optical fibers in the shell extensions and circular pipe with fiber optic cable having a change of hydraulic radius underestimates the size of losses. One source of differences is to change the structure of the velocity distribution in the flow area for analyzed case in relation to the circular pipe. Conducted analysis of CFD models should be verified on physical models.

Authors' addresses:

Piotr Siwicki
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
 ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
 Poland
 e-mail: piotr_siwicki@sggw.pl

Bartosz Szelaż
 Politechnika Świętokrzyska
 Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej
 al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
 Poland
 e-mail: bszelag@tu.kielce.pl