

Lucyna BOGDAN, Grażyna PETRICZEK, Jan STUDZIŃSKI

Instytut Badań Systemowych PAN
Warszawa

MODELOWANIE I PROJEKTOWANIE SIECI KANALIZACYJNYCH Z UŻYCIEM RÓWNAŃ HYDRAULICZNYCH I ALGORYTMU OPTYMALIZACJI¹

MODELLING AND DESIGNING SEWAGE NETWORKS USING
HYDRAULIC EQUATIONS AND AN OPTIMIZATION ALGORITHM

In the paper a concept of two algorithms for modelling and designing sewage sanitary networks with the use of nonlinear hydraulic equations describing the networks and their analytical solutions and resulted diagrams is presented. An example illustrated the operation of the algorithms is shown.

1. Wprowadzenie

Modelowanie i projektowanie sieci kanalizacyjnych jest złożonym zadaniem z powodu złożoności równań opisujących przepływ ścieków w kanałach. Podstawowymi parametrami hydraulicznymi opisującymi sieć kanalizacyjną są przepływ i wysokości wypełnienia kanałów, o czym decydują średnice kanałów i ich spadki. Klasyczny sposób projektowania sieci kanalizacyjnej polega na korzystaniu z tak zwanych nomogramów, będących wykresami wiążącymi średnice, natężenia przepływów, jednostkowe spadki hydrauliczne i średnie prędkości przepływów. Wartości szukanych zmiennych odczytuje się z odpowiednich diagramów, które są wynikiem wcześniejszych przeliczeń podstawowych wzorów stosowanych do hydraulicznego obliczania kanałów: wzorów Chezy'ego, Colebrooke'a-White'a, Manninga (Biedugnis S. 1998; Błaszczuk W. i in. 1983; Chudzicki J. i Sosnowski S. 2004). Bardziej zaawansowany sposób projektowania, to korzystanie z modeli hydraulicznych sieci kanalizacyjnych, na przykład z modelu SWMM5 amerykańskiej firmy EPA (*Environmental Protection Agency*) (Rossmann 2012), co wymaga jednak dosyć zaawansowanej wiedzy informatycznej. Pierwszy sposób jest czysto mechaniczny, drugi dosyć skomplikowany.

¹ Artykuł napisany w ramach projektu nr N N519 6521 40 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN).

W pracy przedstawiono sposób pośredni, czyli algorytm obliczania parametrów hydraulicznych sieci kanalizacyjnych, polegający na stosunkowo prostym numerycznym rozwiązywaniu nieliniowych równań wyprowadzonych z podstawowych reguł i wzorów hydraulicznych. Zastosowana w algorytmie metoda wykorzystana do modelowania i projektowania sieci kanalizacyjnych umożliwia szybką analizę parametrów sieci, podobnie jak w przypadku zastosowania nomogramów, jednocześnie pozwala na zrozumienie wzajemnych zależności między parametrami hydraulicznymi kanałów, co jest możliwe przy analizowaniu numerycznych modeli hydraulicznych sieci.

2. Podstawowe problemy

Poniżej przedstawiono pewne algorytmy modelowania i projektowania sieci kanalizacyjnej sanitarnej. Węzłami sieci są punkty, w których następuje połączenie kilku segmentów lub gałęzi sieci, zmiana parametrów sieci lub dopływ ścieków do sieci. Przyjęto, że segmenty charakteryzują się stałymi parametrami hydraulicznymi, takimi jak kształt i wymiar kanału, spadek dna oraz szorstkość. Dopływ ścieków odbywa się punktowo w węzłach sieci. Ze względu na przyjęte założenia wszystkie zależności dotyczą stanu ustalonego. W węzłach połączeniowych spełnione są równania bilansu przepływów oraz warunek zgodności poziomów zwierciadła ścieków.

Modelowanie sieci sprowadza się do obliczania stopnia wypełnienia kanałów oraz prędkości przepływów w zależności od wartości natężenia przepływów ścieków, przy znanych przekrojach i spadkach kanałów. Obliczenia przeprowadza się dla poszczególnych odcinków sieci między węzłami na podstawie wcześniej określonych wartości przepływów w węzłach sieci. Metoda polega na numerycznym rozwiązywaniu nieliniowych równań opisujących podstawowe zależności w sieci. Równania te wyprowadzone są z podstawowych reguł i wzorów hydraulicznych. Zastosowana w algorytmie metoda umożliwia szybką analizę parametrów sieci, to znaczy stopni wypełnienia oraz prędkości przepływu, i w ten sposób stwarza możliwość symulacji działania sieci kanalizacyjnej. Zmieniając wartości natężeń dopływów ścieków w wybranych węzłach sieci otrzymuje się w prosty sposób nowe wartości stopni wypełnienia i prędkości na odcinkach związanych z wybranymi węzłami.

Projektowanie odcinków sieci dotyczy przypadków, gdy do istniejącej już sieci dołącza się nowe odcinki kanalizacyjne lub gdy dla niektórych odcinków sieci już eksploatowanej wypełnienia przekraczają wartości graniczne. Problem sprowadza się wówczas do wyboru średnic nowych kanałów oraz do obliczenia spadków dna kanałów. Zakładamy, że znane są prognozowane wartości dopływu ścieków.

3. Algorytm modelowania

W przedstawionym w pracy algorytmie obliczenia sieci kanalizacyjnej przyjmuje się następujące założenia:

- typ sieci – sanitarna,
- struktura sieci kanalizacyjnej zdefiniowana przez liczbę odcinków oraz liczbę i rodzaj węzłów,

- jest znany maksymalny dopływ ścieków do poszczególnych węzłów sieci,
- są znane spadki dna oraz wymiary kanałów.
Zadaniem algorytmu jest dla każdego odcinka sieci:
- wyznaczenie stopnia wypełnienia kanału ściekami,
- ustalenie prędkości przepływu.

Najbardziej istotną częścią algorytmu jest wyznaczenie wysokości wypełnienia H_i (lub stopnia wypełnienia kanału $x = H_i/d_i$) i prędkości przepływu v_i dla każdego segmentu sieci przy zadanych natężeniach przepływu q_i w poszczególnych węzłach sieci. Problem ten sprowadza się do rozwiązania nieliniowych równań wyprowadzonych z podstawowych reguł i wzorów hydraulicznych

1. Ze wzoru Manninga na wielkość natężenia przepływu, uwzględniając geometrię przewodu otrzymujemy równania opisujące zależność stopnia napelnienia kanału H/d od przepływu Q . Równania te mają następującą postać (Biedugnis 1998; Bogdan i in. 2013):

Dla i -tego odcinka sieci z równania bilansu przepływów wynika:

$$Q = q_i + \sum_{j < i} Q_j \quad (1)$$

Dla $H/d \leq 0,5$:

$$x = \frac{H}{d}$$

$$\beta \cdot F_1(x) - Q = 0 \quad (2a)$$

$$F_1(x) = \frac{(\varphi_1(x) - \sin(\varphi_1(x)))^{\frac{5}{3}}}{\varphi_1(x)^{\frac{2}{3}}} \quad (2b)$$

$$\varphi_1(x) = 2 \cdot \arccos(1 - 2 \cdot x) \quad (2c)$$

Dla $H/d > 0,5$:

$$x = \frac{H}{d}$$

$$\beta \cdot F_2(x) - Q = 0 \quad (3a)$$

$$F_2(x) = 2 \cdot \frac{(\pi - 0,5 \cdot \varphi_2(x) + 0,5 \cdot \sin(\varphi_2(x)))^{\frac{5}{3}}}{(\pi - 0,5 \cdot \varphi_2(x))^{\frac{2}{3}}} \quad (3b)$$

$$\varphi_2(x) = 2 \cdot \arccos(2 \cdot x - 1) \quad (3c)$$

$$\beta = 0,5 \cdot \frac{1}{n} \cdot (d)^{\frac{8}{3}} \cdot \left(\frac{1}{4}\right)^{\frac{5}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

gdzie: d –średnica kanału w [m], n –współczynnik szorstkości w [s/m^{1/3}], J –spadek dna kanału w %, φ –kąt środkowy, H –wysokość wypełnienia w [m], $\frac{H}{d}$ –stopień wypełnienia, Q –natężenie przepływu w [m³/s] na odcinku, q_i –natężenie dopływu ścieków do i -tego odcinka.

Parametr β dany wzorem (4) zależy od średnicy kanału d oraz od spadku dna kanału J i dla ustalonych wartości średnic d i spadków J jest stałą. Równania (2a)–(3a) służące do obliczenia stopnia wypełnienia kanału są nieliniowe i do ich rozwiązania można zastosować ogólnie dostępne numeryczne metody przybliżonego rozwiązywania równań nieliniowych. Równania (1), (2a)–(2c), (3a)–(3c) stanowią model opisujący podstawowe zależności w sieci. Dla znanych ustalonych przekrojów i spadków kanałów opisują one

zależność stopnia wypełnienia kanału x od wielkości natężenia przepływu ścieków. W tym modelu stopień wypełnienia kanału x jest zmienną, która zależy od wejść w postaci natężeń dopływu ścieków w poszczególnych węzłach sieci. Parametrami zaś są średnice kanałów d oraz spadki dna kanału J .

Przedstawimy teraz szczegółową analizę tych równań oraz warunki, jakie muszą spełniać parametr β oraz natężenie przepływu Q , żeby istniały pierwiastki tych równań.

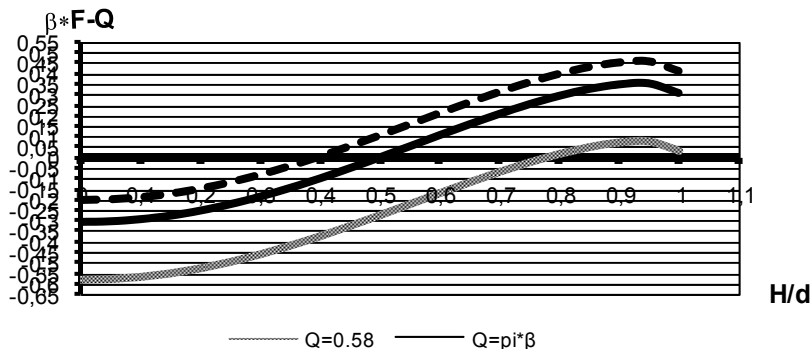
Funkcja $F(x)=F_1(x)+F_2(x)$ ma następujące właściwości:

- $F(x)$ jest funkcją ciągłą w przedziale $(0;1>$. Dla $x=1$, czyli całkowitego wypełnienia, $F=2\pi$. Dla $x=0,5$, czyli połowy wypełnienia, $F=\pi$.
- $F(x)$ w przedziale $(0;0,8>$ jest monotonicznie rosnąca.
- $F(x)$ w przedziale $(0,8;1>$ osiąga maksimum dla $x=0,9381$, $F_{\max}=6,7588$.
- $F(x)$ w przedziale $(0,9381;1>$ jest funkcją malejącą.

Dla ustalonych parametrów sieci, takich jak średnica d oraz spadek dna kanału J , równanie $\beta F(x)-Q=0$ ma rozwiązania zależne od wartości przepływu Q . Zmieniając natężenie przepływu, zmienia się rozwiązania równania. Równanie $\beta F(x)-Q=0$ posiada następujące pierwiastki:

- Dla $x \in (0;0,5>$ równanie posiada tylko jeden pierwiastek i musi być spełniona następująca nierówność: $0 < Q \leq \pi \cdot \beta$. Nierówność ta przy zadanych wartościach średnic d i spadków dna kanału J wyznacza pewien zakres wartości dla przepływów Q .
- Dla $x \in (0,5;1>$ równanie $\beta \cdot F(x)-Q=0$ posiada następujące pierwiastki:
 - ♦ jeden pierwiastek dla $x \in (0,5;1)$ i $\pi \beta < Q < 2\pi \cdot \beta$
 - ♦ dwa pierwiastki dla $x \in (0,5;1>$ i $2\pi \beta \leq Q < \beta \cdot 6,7586936$, przy czym dla $Q=2\pi \beta$: $x_1=1$ i $x_2=0,81963$.

Powyzszą analizę przedstawiono na rys. 1 dla $d=0,6$, $J=2\%$, $n=0,013$ oraz dla różnych wartości przepływów Q .



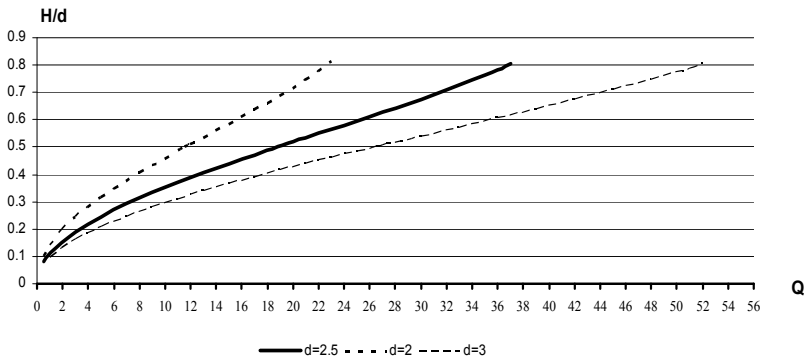
Rys. 1. Wykresy funkcji $\beta \cdot F(H/d)-Q$ dla różnych wartości Q z przedziału $(0;2\pi\beta)$.

Podsumowując rozważania można stwierdzić, że równanie $\beta F - Q = 0$ posiada pierwiastki dla Q z przedziału $(0; \beta \cdot 6,7586936)$, tzn.:

- ◆ jeden pierwiastek dla $Q \in (0; 2\pi \cdot \beta)$
- ◆ dwa pierwiastki dla $Q \in (2\pi \beta; \beta \cdot 6,7586936)$.

Dla ustalonych wartości parametrów sieci, takich jak średnica d oraz spadek dna kanału J , powyższe zależności pozwalają ocenić, jak dla zadanego przepływu Q zachowują się rozwiązania i czy wartość przepływu Q nie przekracza górnej granicy $\beta \cdot 6,7586936$, co powoduje brak rozwiązań. W takim przypadku należy rozważyć możliwości zmiany bądź jednego z ustalonych parametrów sieci, tzn. średnicy d lub spadku dna kanału, bądź obu parametrów.

Poniżej przedstawiono zależność rozwiązania równania $\beta F(x) - Q = 0$ od wartości przepływów Q dla $n = 0,013$ i $0 < Q < 2\pi\beta$ oraz dla różnych wartości średnic d , $J = \frac{1}{d}$.



Rys. 2. Zależność rozwiązania równania $\beta F(x) - Q = 0$ od wartości przepływów Q dla różnych wartości średnic d .

2. Dla obliczonego stopnia napełnienia H/d obliczamy promień hydrauliczny R według wzoru:

Dla $H/d \leq 0,5$:

$$R = \frac{1}{4} d \left(1 - \frac{\sin \varphi}{\varphi} \right) \tag{5a}$$

$$\varphi(x) = 2 \cdot \arccos \left(1 - 2 \cdot \frac{H}{d} \right) \tag{5b}$$

Dla $H/d > 0,5$:

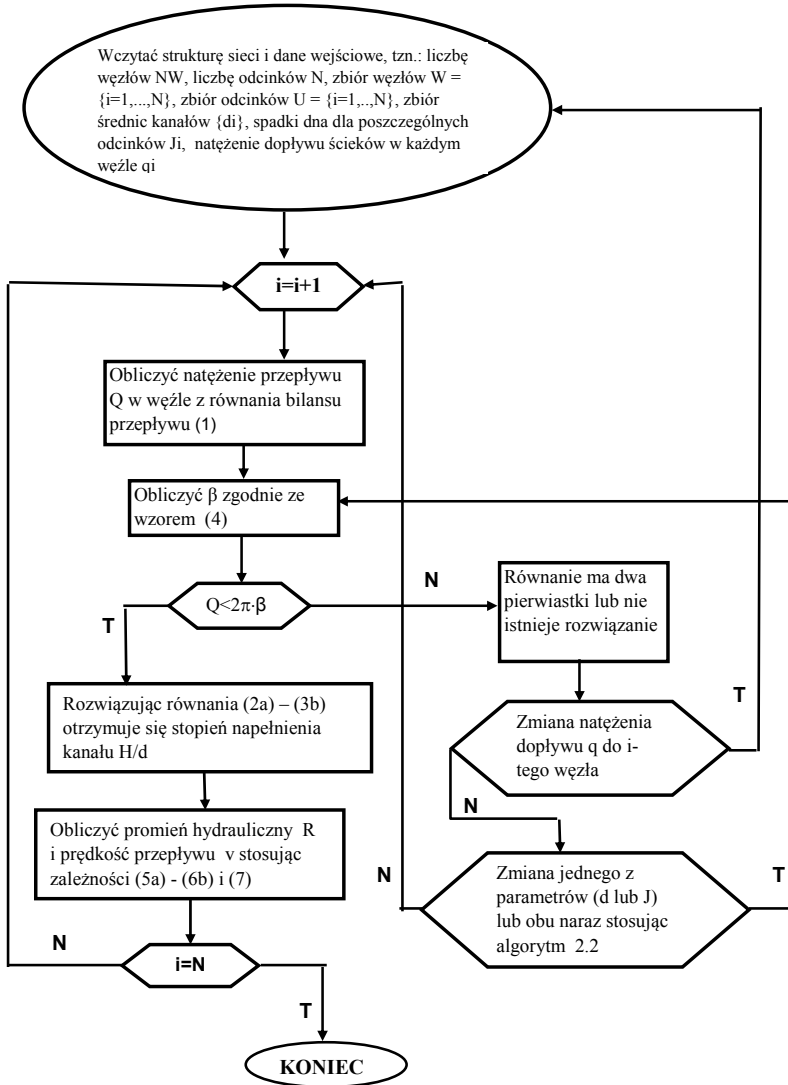
$$R = \frac{\pi d - 0,5 \cdot d \cdot \varphi + 0,5 \cdot d \cdot \sin(\varphi)}{4 \cdot (\pi - 0,5 \cdot \varphi)} \tag{6a}$$

$$\varphi(x) = 2 \cdot \arccos \left(2 \cdot \frac{H}{d} - 1 \right) \tag{6b}$$

3. Obliczanie prędkości v według wzoru Manninga:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

gdzie n – współczynnik szorstkości.

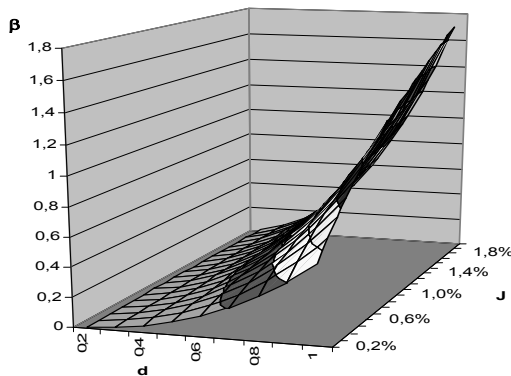


Rys. 3. Algorytm obliczania wysokości napelnienia kanałów i prędkości przepływów.

Znając geometrię sieci kanalizacyjnej (kształt, wartości średnic, spadki dna kanału) oraz wartości dopływów ścieków Q , można obliczyć wysokości napelnienia oraz prędkości przepływów dla każdego odcinka sieci. Obliczenia są realizowane kolejno dla każdego odcinka sieci, zaczynając od położonego najdalej od wylotu sieci, a kończąc na obliczaniu odcinka najbliższego oczyszczalni ścieków. Zastosowana w algorytmie metoda umożliwia szybką analizę parametrów sieci (stopni napelnienia oraz prędkości przepływu) i w ten sposób stwarza możliwość symulacji działania sieci kanalizacyjnej. Zmieniając wartości natężeń dopływów ścieków w wybranych węzłach sieci otrzymuje się w prosty sposób nowe wartości stopni napelnienia i prędkości na odcinkach związanych z wybranymi węzłami. Zmieniając dopływy ścieków do kanałów ponownie przelicza się całą sieć. Przedstawiony algorytm może stanowić część całkowitego modelu obliczania sieci kanalizacyjnych. Schemat algorytmu przedstawiono na rys. 3.

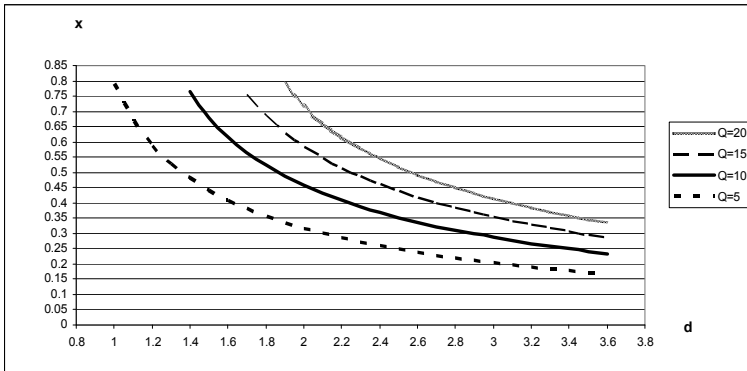
4. Algorytm projektowania

Jak wynika z przedstawionych wyżej zależności, wartość przepływu Q uwarunkowana jest wartością parametru β , który z kolei zależy od średnicy kanału d oraz od spadku dna J . W przedziale $(0; 2\pi\beta)$ równanie opisujące zależność stopnia wypełnienia od przepływu posiada jedno rozwiązanie i właśnie z tego względu ten przedział jest istotny. Zależności parametru β od średnicy d i spadku J przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wykres zależności parametru β od średnicy d i spadku J .

Z rozwiązań równań (2a)–(2b) można obliczyć zależność stopnia wypełnienia kanału x od wartości średnicy kanału d dla ustalonych wartości przepływów. W tych obliczeniach uwzględnia się warunek na dopuszczalne wartości przepływu $Q < 2\pi\beta$. Wykres tych zależności przedstawia rys. 5. Z analizy wykresu wynika, że im większe natężenie przepływu Q , tym większa musi być średnica d , aby zapewnić odpowiedni stopień wypełnienia x . Z kolei stopień wypełnienia x jest funkcją malejącą wartości średnicy d .



Rys. 5. Wykres zależności stopnia wypełnienia x od średnicy d dla różnych wartości przepływu Q .

Przedstawiony poniżej algorytm projektowania dotyczy następujących przypadków:

- Przepływ Q przekracza górną granicę $2\pi\beta$ i należy zastanowić się nad zmianami zadanych wielkości średnic d i spadków J .
- Projektowanie nowych odcinków sieci; dotyczy to sytuacji, w której do istniejącej już sieci należy dołączyć nowe odcinki kanalizacyjne. Problem sprowadza się do wyboru średnic nowych kanałów oraz obliczenia spadków dna kanałów. Zakładamy, że znane są prognozowane wartości dopływu ścieków Q .

W obu przypadkach przy obliczaniu średnic d i spadków J dla nowych odcinków kanałów dla znanych wartości dopływów ścieków należy uwzględnić nierówność $2\pi\beta - Q > 0$. Spełnienie tej nierówności gwarantuje istnienie tylko jednego rozwiązania równania opisującego zależność stopnia napełnienia od przepływu Q .

Procedura obliczeń średnic oraz spadków zawiera następujące kroki, które są przeprowadzane dla znanych prognoz wartości przepływów ścieków Q :

Krok 1. Wyznaczanie wartości spadków kanału J . Wartości te są obliczane zgodnie z obowiązującymi standartami technicznymi lub zależnościami istniejącymi w literaturze (Kwietniewski i Nowakowska-Błaszczuk 1981; Puchalska i Sowiński 1984; Wartalski i Wartalski 2000).

$$1. \quad J = \frac{a}{d} \quad (8a)$$

gdzie a – parametr zależny od rodzaju sieci.

2. Minimalny spadek kanału zapewniający występowanie procesu samooczyszczania się kanału:

$$J = \frac{\tau_{\min}}{\rho \cdot R} = \frac{4 \cdot \tau_{\min} \cdot (\pi - 0,5 \cdot \varphi)}{\rho \cdot (\pi - 0,5 \cdot \varphi + 0,5 \cdot \sin \varphi)} \cdot \frac{1}{d} \quad (8b)$$

$$\varphi = 2 \cdot \arccos \left(2 \cdot \frac{H}{d} - 1 \right)$$

gdzie J –minimalny spadek dna kanału zapewniający występowanie procesu samooczyszczania się kanału, τ_{\min} –średnie naprężenie styczne w $[\text{kg}/\text{m}^2]$, przy czym zaleca się, żeby przy projektowaniu sieci bytowo-gospodarczej przyjmować $\tau_{\min} > 0,225 \text{ kg}/\text{m}^2$, ρ –gęstość ścieków (bliska gęstości wody) w $[\text{kg}/\text{m}^3]$, R –promień hydrauliczny.

3. Spadek kanału jest spadkiem granicznym i opisany jest następującą zależnością:

$$J_g = \frac{3,778 \cdot 10^{-3}}{d^{1/3}} \quad (8c)$$

Krok 2. Rozwiązanie następujących równań:

$$\zeta \cdot d^{\frac{8}{3}} - Q = 0 \quad \zeta = \frac{\pi}{n} \cdot \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

- a) Dla $J = \frac{a}{d}$:

$$\alpha_1 \cdot d^{\frac{13}{6}} - Q = 0 \quad \alpha_1 = \frac{\pi}{n} \cdot \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot a^{\frac{1}{2}} \quad (10a)$$

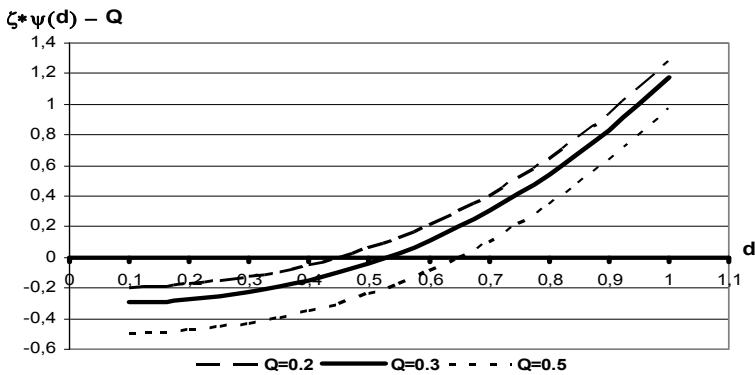
- b) Dla J zapewniającego samooczyszczanie się kanału:

$$\alpha_2 \cdot d^{\frac{13}{6}} - Q = 0 \quad \alpha_2 = \frac{2\pi}{n} \cdot \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot \left(\frac{\tau_{\min}}{1,1106 \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10b)$$

- c) Dla spadku granicznego J :

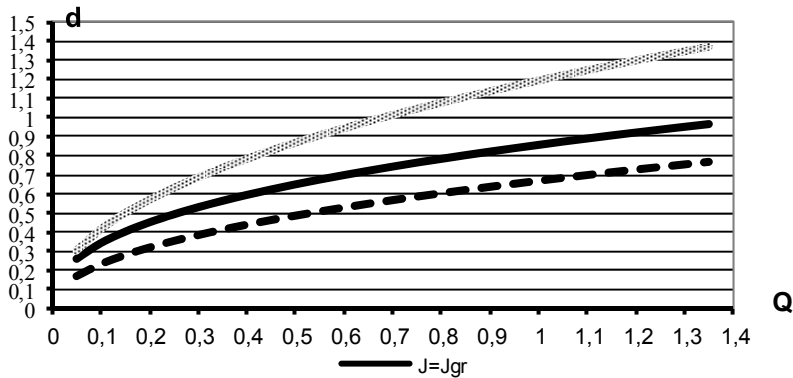
$$\alpha_3 \cdot d^{\frac{5}{2}} - Q = 0 \quad \alpha_3 = \frac{\pi}{n} \cdot \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot \left(3,778 \cdot 10^{-3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10c)$$

Z powyższych równań wynika, że średnica d jest pewną funkcją natężenia przepływu Q . Rozwiązując te równania, otrzymamy wartość średnicy d dla prognozowanego natężenia przepływu Q . Obrazowo dla spadku granicznego (przypadek c) można to przedstawić na wykresie (rys. 6):



Rys. 6. Wykres funkcji $\zeta \cdot d^{\frac{5}{2}} - Q$ dla różnych wartości natężeń przepływu Q .

Rozwiązując równania (9) dla zadanego Q otrzymujemy minimalną graniczną wartość średnicy d_* , powyżej której nierówność $\zeta \cdot d^{\frac{8}{3}} - Q > 0$ jest spełniona. Wartości średnicy mniejsze bądź równe tej wartości granicznej są niedozwolone, ponieważ przy nich nierówność nie jest spełniona.

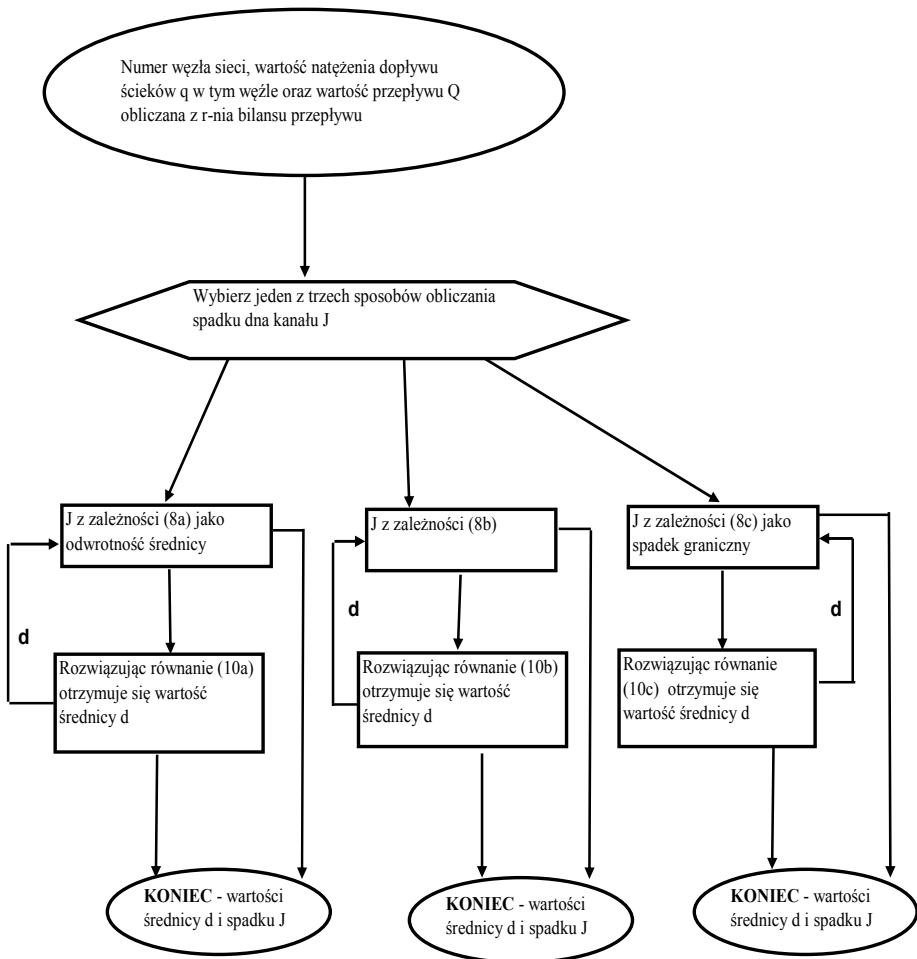


Rys. 7. Zależności między średnicą kanału d a przepływem Q dla charakterystycznych spadków kanału J .

Jeśli rozwiązanie d_* równania (9) istnieje, wtedy nierówność $\zeta \cdot d^{\frac{8}{3}} - Q > 0$ jest spełniona dla wszystkich wartości $d > d_*$. Dla obliczonego z zależności (8a)–(8c) spadku kanału J w **Kroku 2** rozwiązuje się odpowiednie równanie (10a)–(10c) i przyjmuje wartości d większe od rozwiązania d_* równania. Następnie dla tej wartości d przechodzimy znowu do **Kroku 1** i obliczamy odpowiednie spadki J .

W przypadku, gdy rozwiązanie równania (9) nie istnieje, następuje powrót do **Kroku 1**, zmiana wartości J i rozwiązanie powtórne równania (9). Zależności między rozwiązaniem równania (8) wyznaczającym wartość średnicy kanału d a wartościami przepływu Q dla różnych spadków kanału J są przedstawione na rys. 7.

Schemat algorytmu projektowania przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Schemat algorytmu projektowania.

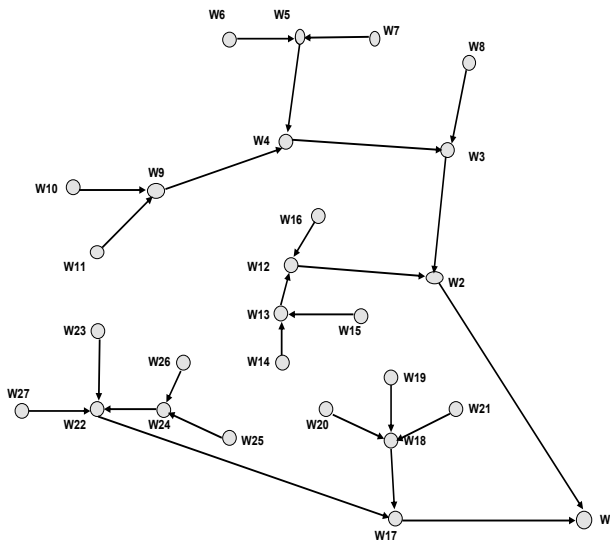
5. Przykład modelowania i projektowania sieci kanalizacyjnej

Zaprezentowane algorytmy modelowania i projektowania przetestowano na przedstawionej niżej przykładowej sieci kanalizacji sanitarnej składającej się z 27 węzłów łączonych ze sobą odcinkami. Sieć posiada 15 węzłów wejściowych (W6, W7, W8, W10, W11, W14, W15, W16, W19, W20, W21, W23, W25, W26, W27) oraz jeden węzeł wyjściowy W1. W pozostałych węzłach sieci następuje połączenie kilku odcinków sieci.

Schemat sieci przedstawiono na rys. 9 (Służalec i in. 2013B). Na schemacie strzałkami zaznaczono kierunki przepływu ścieków. Dla węzłów wejściowych zadane są wartości natężeń dopływu ścieków. W węzłach połączeniowych należy obliczać natężenia przepływu zgodnie z równaniem bilansu przepływu. Dla poszczególnych odcinków zadane są wartości średnic $d=0,2$ m oraz spadki dna kanałów $J=0,5\%$. Dla sieci o takiej strukturze obliczono stopnie wypełnienia H/d oraz prędkości przepływów w poszczególnych odcinkach sieci. Ponadto rozważaną sieć przeliczono za pomocą systemu MOSKAN opracowanego w IBS PAN i działającego w oparciu o model hydrauliczny SWMM5 (Służalec i in. 2013A).

Uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 1. Należy zaznaczyć, że wyniki uzyskane przy użyciu przedstawionego w pracy algorytmu są porównywalne z wynikami uzyskanymi za pomocą systemu MOSKAN. Różnice wynikają z zaokrągleń, które są stosowane w systemie MOSKAN.

Z analizy wyników przedstawionych w tab.1 wynika, że dla dwóch odcinków sieci 21 i 26 stopnie wypełnienia są bardzo duże i znacznie przewyższają zadaną dopuszczalną wartość 75% średnicy kanału. Ponieważ nie można zmienić natężeń dopływów ścieków, należy obliczyć nowe wartości średnic d i spadków J dla tych odcinków. Obliczenia projektowania przeprowadzono w oparciu o przedstawiony wcześniej algorytm projektowania a otrzymane wyniki są pokazane w tab. 2.



Rys. 9. Schemat badanej sieci kanalizacyjnej.

Tab. 1. Wyniki obliczeń hydraulicznych przykładowej sieci przedstawionej na rys. 9.

Węzeł górny	Węzeł dolny	Odcinek	Dopływ ścieków do węzła	Przepływ Q [dm ³ /s]	H/d [%]	v [m/s]	H/d [%] MOSKAN	v [m/s] MOSKAN
W6	W5	1	0,56	0,56	10,72	0,309	11	0,29
W7	W5	2	0,31	0,31	8,09	0,259	8	0,26
W5	W4	3	0,27	1,14	15,08	0,383	15	0,38
W10	W9	4	0,36	0,36	8,69	0,271	9	0,27
W11	W9	5	1,13	1,13	15,02	0,382	14,6	0,39
W9	W4	6	0,64	2,13	20,48	0,460	20	0,46
W4	W3	7	0,64	3,91	27,78	0,549	28	0,55
W8	W3	8	0,11	0,11	4,98	0,189	5	0,19
W3	W2	9	0,1	4,12	28,53	0,557	29	0,56
W14	W13	10	0,11	0,11	4,98	0,189	5	0,19
W15	W13	11	0,32	0,32	8,22	0,261	8	0,26
W13	W12	12	0,23	0,66	11,59	0,325	12	0,33
W16	W12	13	0,24	0,24	7,17	0,240	7	0,24
W12	W2	14	1,86	2,76	23,29	0,497	23	0,49
W2	W1	15	0,73	7,61	39,42	0,661	39	0,66
W23	W22	16	4,56	4,56	30,06	0,574	30	0,58
W27	W22	17	4,4	4,4	29,51	0,568	30	0,57
W25	W24	18	4,81	4,81	30,90	0,582	31	0,58
W26	W24	19	3,53	3,53	26,37	0,533	26	0,53
W24	W22	20	3,69	12,03	51,10	0,745	51	0,75
W22	W17	21	1,53	22,52	79,47	0,841	79	0,84
W19	W18	22	0,83	0,83	12,94	0,348	13	0,35
W20	W18	23	0,3	0,3	7,97	0,256	8	0,26
W21	W18	24	0,19	0,19	6,43	0,223	6	0,22
W18	W17	25	0,22	1,54	17,46	0,419	17	0,42
W17	W1	26	0,57	24,63	89,27	0,832	89	0,83
W1	oczyszczalnia							

Tab. 2. Wyniki projektowania sieci kanalizacyjnej.

Węzeł górny	Węzeł dolny	Q	Wariant 1 algorytmu				Wariant 2 algorytmu				Wariant 3 algorytmu			
			d	J [‰]	H/d [%]	v [m/s]	d	J [‰]	H/d [%]	v [m/s]	d	J [‰]	H/d [%]	v [m/s]
W22	W17	22,52	0,25	4	55,76	0,771	3,5	6,2	30,25	0,632	3	5,6	38,23	0,632
W17	W1	24,63	0,25	4	59,01	0,787	3,5	6,2	35,43	0,687	3	5,6	40,13	0,687

Zastosowano trzy warianty obliczenia spadków dna J: 1) J jest odwrotnością średnicy d; zależność (8a); 2) J jest minimalnym spadkiem kanału zapewniającym występowanie procesu samooczyszczania się kanału; zależność (8b); 3) J jest spadkiem granicznym danym zależnością (8c).

Wartości średnic d otrzymano rozwiązując odpowiednie równanie (10a), (10b) lub (10c), odpowiadające wybranemu wariantowi obliczania J. Dla tych nowych wartości średnic d i spadków kanałów J obliczono stopnie wypełnienia H/d oraz prędkości przepływu w tych odcinkach. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 2.

Z analizy wyników zawartych w tab. 2 wynika, że dla zadanych wartości przepływów najmniejszy stopień wypełnienia uzyskuje się dla spadku J będącego minimalnym spadkiem zapewniającym występowanie procesu samooczyszczania się kanału, zaś dla spadku J będącego odwrotnością średnicy stopień wypełnienia H/d jest największy i przekracza 50%.

Bibliografia

- [1] Biedugnis S. (1998) *Metody informatyczne w wodociągach i kanalizacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [2] Bogdan L., Petriczek G., Studziński J. (2013) *Mathematical modeling and computer aided planning of communal sewage networks*. JAMRIS, Industrial Research Institute for Automation and Measurements PIAP, Warsaw (w druku).
- [3] Błaszczyk W., Stamatello H., Błaszczyk P. (1983) *Kanalizacja. Sieci i pompownie*. Tom I. Arkady. Warszawa.
- [4] Chudzicki J., Sosnowski S. (2004) *Instalacje kanalizacyjne*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa.
- [5] Kwietniewski M., Nowakowska-Błaszczyk A. (1981) *Obliczenia hydrauliczne kanałów ściekowych na podstawie krytycznych natężeń stycznych*. Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej – Wodociągi i Kanalizacja, Warszawa.
- [6] Puchalska E., Sowiński N. (1984) *Wymiarowanie kanałów ściekowych metodą krytycznych naprężeń stycznych*. Ochrona Środowiska. Nr 3-4, Wrocław.
- [7] Rossman L. (2012) *Storm Water Management Model (SWMM) – User's manual, Version 5.0.022*; www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/swmm/.
- [8] Służalec A., Studziński J., Ziółkowski A. (2013A) *Optimization of sewerage structure in the integrated system for sewage design, management and revitalization – MOSKAN*. In: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften (J. Wittmann, M. Mueller, Hrsg.), ASIM-Mitteilung AM 146, 203-210.
- [9] Służalec A., Studziński J., Ziółkowski A. (2013B) *Rechnerunterstützte Planung von kommunalen Abwassernetzen mittels des hydraulischen Modells und statischer Optimierung*. Modellierung und Simulation von Ökosystemen (Nguyen Xuan Thinh, Hrsg.), Workshop Koelpinsee 2012, Shaker Verlag, Aachen, 123-133.
- [10] Wartalski A., Wartalski J. (2000) *Projektowanie hydrauliczne rurociągów z tworzyw sztucznych*. Ochrona Środowiska, nr 1/76, 19-24.