

136/2007

**Raport Badawczy**  
**Research Report**

**RB/43/2007**

**Modelowanie  
sieci kanalizacyjnych**

**L. Bogdan**

**Instytut Badań Systemowych**  
**Polska Akademia Nauk**

**Systems Research Institute**  
**Polish Academy of Sciences**



# **POLSKA AKADEMIA NAUK**

## **Instytut Badań Systemowych**

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 8373578

fax: (+48) (22) 8372772

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:  
Doc. dr hab. inż. Jan Studziński

Warszawa 2007

# **Modelowanie sieci kanalizacyjnej**

Lucyna Bogdan

## Spis treści

1. Wstęp
2. Równania Saint-Venante'a i metoda modelowania sieci kanalizacyjnej
3. Liczba Frouda i spadek krytyczny
4. Schemat blokowy obliczeń hydraulicznych
5. Zależność prędkości przepływu od metody obliczeń (wzór Manninga kontra wzór Colebrooka –White'a)

## 1. Wstęp

W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z modelowaniem rozgałęzionej sieci kanalizacyjnej. Przedstawiono równania opisujące sieć kanalizacyjną, metodę modelowania sieci oraz problemy związane ze spadkiem krytycznym i jego wpływem na natężenie przepływu. Zaprezentowano również wyniki obliczeń prędkości przepływu za pomocą wzoru Manninga i porównano je z wynikami obliczeń za pomocą wzoru Colebrooka-White'a.

## 2. Równania Saint-Venante'a i metoda modelowania sieci kanalizacyjnej

Modele sieci kanalizacyjnej bazują na następujących równaniach równaniach Saint-Venante'a:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{A \cdot g} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2 \cdot V \cdot \partial Q}{\partial x} + (1 - F^2) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} = \\ = \frac{V^2}{A \cdot g} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + S_o + S_t + D_L - \frac{Vq}{A \cdot g} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$A$  — pole przekroju strumienia, m

$Q$  — natężenie przepływu  $\text{dm}^3/\text{s}$

$q$  — boczny dopływ na jednostkę długości kanału,  $\text{dm}^3/\text{m s}$

$V = \frac{Q}{A}$  — średnia prędkość przepływu, m/s

$S_o$  — spadek dna kanału

$S_t$  — spadek wywołany oporami tarcia

$F$  — liczba Froude'a

$B$  — szerokość zwierciadła wody, m

$g$  — przyspieszenie ziemskie,  $\text{m}/\text{s}^2$

$D_L$  — człon zależny od rodzaju dopływu  $q$ .

Rozwiązanie układu równań (1) i (2), gdzie przepływ  $Q$  i wysokość napelnienia  $H=f(A)$  są wielkościami niewiadomymi wymaga rozwiązania układu  $2L/\Delta x$  równań, gdzie  $L$  oznacza długość odcinka, a  $\Delta x$  jest krokiem.

Proces ten musi być powtarzany, aż uzyska się spełnienie z zadaną dokładnością dwóch warunków:

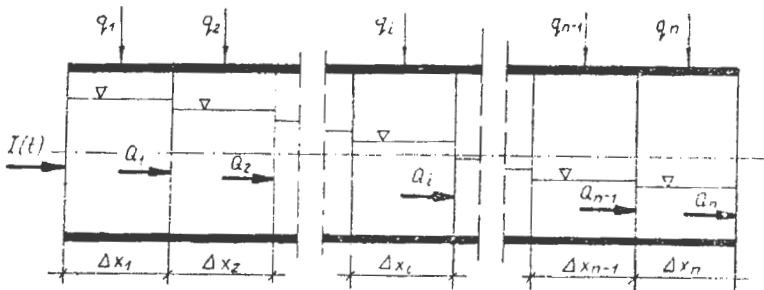
- sumy dopływów w węzłach równej 0 ( $\sum Q=0$ )
- zgodności poziomów zwierciadeł wody.

Poniżej przedstawimy metodę modelowania pracy sieci kanalizacyjnej opartą na równaniu ciągłości (1) i równaniu uwzględniającym straty hydrauliczne, opisane wzorem Manninga:

$$Q = \frac{1}{N} \cdot R^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \cdot A \quad [\text{dm}^3/\text{s}] \quad (3)$$

$R$  — promień hydrauliczny, m  
 $N$  — współczynnik szorstkości.

Opis metody przeprowadzono na podstawie odcinka kanału przedstawionego na rysunku 1. Kanał ten podzielony jest na „n” części o długościach odpowiednio  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ . Do kanału dopływa w danej chwili czasowej określona wielkość  $I(t)$ . Do każdego z elementar-



Rys. 1 Schemat obliczeniowy odcinka kanału

nych fragmentów odcinka o długości  $\Delta x_i$  (za wyjątkiem pierwszego) dopływa  $Q_{i-1}$  a wypły-

wa  $Q_i$ . Zmiany przepływów w poszczególnych segmentach można zapisać w postaci równań:

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= Q_1 - I(t) - q_1 \\ \Delta Q_2 &= Q_2 - Q_1 - q_2 \\ \Delta Q_i &= Q_i - Q_{i-1} - q_i \\ \Delta Q_n &= Q_n - Q_{n-1} - q_n\end{aligned}\quad (4)$$

gdzie:  $q_i = q(t) \cdot \Delta x_i$

Dopływ do kanału  $I(t)$  oraz dopływ na jednostkę długości  $q(t)$  są wartościami zadawanymi, natomiast  $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$  mogą być obliczone przy wykorzystaniu równania Manninga:

$$\begin{aligned}Q_1 &= \frac{1}{N} \cdot R_1^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \cdot A_1 \\ &\vdots \\ Q_i &= \frac{1}{N} \cdot R_i^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \cdot A_i \\ &\vdots \\ Q_n &= \frac{1}{N} \cdot R_n^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \cdot A_n\end{aligned}\quad (5)$$

przy założeniu, że współczynnik chropowatości „N” oraz spadek dna kanału  $S_o$  są stałe na całej długości rozpatrywanego odcinka. Po przekształceniu równania (1) do postaci:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta x} + \frac{\Delta A}{\Delta t} = 0 \quad (6)$$

i po połączeniu z równaniami (4) powstaje układ określający zmianę pola przekroju  $\Delta A$  w czasie  $\Delta t$ :



$$\begin{aligned}\frac{\Delta A_i}{\Delta t} &= \frac{I(t) - Q_1}{\Delta x_1} + q(t) \\ \frac{\Delta A_i}{\Delta t} &= \frac{Q_{i-1} - Q_i}{\Delta x_i} + q(t) \\ \frac{\Delta A_n}{\Delta t} &= \frac{Q_{n-1} - Q_n}{\Delta x_n} + q(t)\end{aligned}\quad (7)$$

Obliczone zmiany pola przekroju są wykorzystywane przy określaniu wartości  $A$  w następnym kroku czasowym:

$$A(t + \Delta t) = A(t) + \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot \Delta t \quad (8)$$

po połączeniu równań (8) i (7) otrzymano:

$$\begin{aligned}A_1(t + \Delta t) &= A_1(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x_1} [I(t) - Q_1] + q(t) \cdot \Delta t \\ A_i(t + \Delta t) &= A_i(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (Q_{i-1} - Q_i) + q(t) \cdot \Delta t \\ A_n(t + \Delta t) &= A_n(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x_n} (Q_{n-1} - Q_n) + q(t) \cdot \Delta t\end{aligned}\quad (9)$$

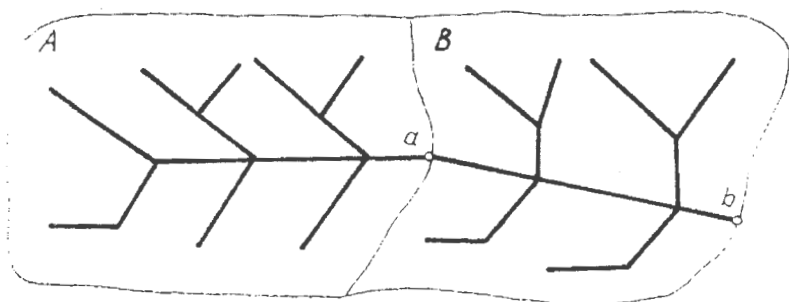
Rozwiązując równania (9) od chwili czasu  $t=0$  (po założeniu warunków początkowych np. wartości przepływu w kanale) do wyczerpania czasu symulacji przy zadawanych dopływach  $I(t)$  i  $q(t)$  powstanie zestaw wartości  $A_{x=0,L}$  dla  $t=0,T$  każdego punktu podziału odcinka (krok  $\Delta x_i$ )

na wszystkich poziomach czasu symulacji (krok  $\Delta t$ ), gdzie  $L$  — długość odcinka,  $T$  — całkowity czas symulacji.

Na tej podstawie określić można korzystając z równania Manninga: wartość przepływów  $Q_{x=0,L; t=0,T}$ ; prędkości  $V_{x=0,L; t=0,T}$  i napełnienia kanału

$H_{x=0,L; t=0,T}$ . Wykorzystując obliczony wypływ z kanału  $Q_n$ , jako dodatkowy dopływ do następnego przewodu, można symulować powyższą metodą dowolne fragmenty sieci.

Takie rozwiązanie umożliwi fragmentaryczne traktowanie wybranych obszarów sieci (rys. 2).



Rys. 2 Podział sieci kanalizacyjnej na dwie podsieci

Symulując przepływy w podsieci B w punkcie „a” należy zadać funkcję dopływu  $I_a(t)$  opisującą odpływ z podsieci A założoną z góry lub otrzymaną w wyniku wcześniejszej symulacji przepływów we fragmencie A sieci.

Model zbudowany na podstawie wyżej przedstawionej metody wymaga zadania danych:

- charakteryzujących układ sieci (połączenia kanałów)

- dotyczących odcinków sieci, tj. spadki, długości, typy i wymiary kanałów, współczynniki chropowatości
- początkowych (przepływy początkowe dla rozpoczęcia obliczeń np. przepływ wód infiltracyjnych)
- dotyczących dopływów w czasie  $I(t)$  i  $q(t)$
- dotyczących przebiegu procesu symulacji tj. czas symulacji, kroki czasowe, podział odcinków na segmenty, rodzaj otrzymywanych wyników itp.

Dopływy wód deszczowych do kanałów mogą być zadawane bezpośrednio wg określonych na podstawie badań terenowych funkcji  $I(t)$  i  $q(t)$  lub pośrednio poprzez funkcje opisujące deszcz i zlewnię. Na przykład wartość natężenia deszczu można określić na podstawie badań lub ogólnych wzorów empirycznych:

— dla terenu całej Polski

$$q_d = \frac{470 \cdot \sqrt[3]{c}}{t_d^{0,6667}} \quad [\text{dm}^3/\text{s ha}] \quad (10)$$

— dla Krakowa

$$q_d = \frac{1644,7}{p^{0,3738} t_d^{0,3945}} \quad [\text{dm}^3/\text{s ha}] \quad (11)$$

gdzie

- $q_d$  — natężenie deszczu,  $\text{dm}^3/\text{s ha}$ ,
- $c$  — okres jednorazowego przekroczenia danego deszczu, lata,
- $t_d$  — czas trwania deszczu, min,
- $p$  — częstotliwość pojawienia się deszczu,  $\%$ , ( $p=100/c$ ).

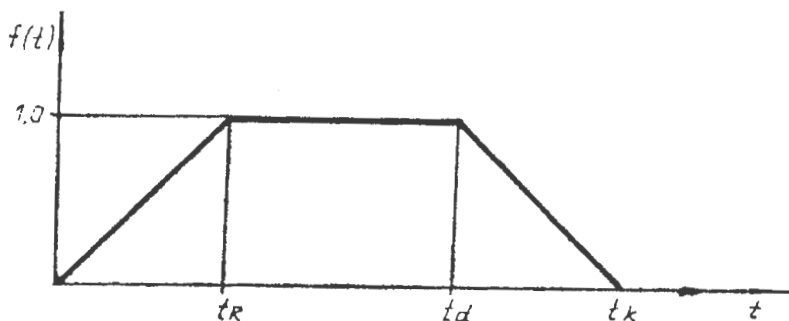
Ilość wody, która nie dopłynie do kanału tzn. wsiąknie w teren, zostanie zatrzymana, wyparuje, można uwzględnić przez zastosowanie współczynnika spływu  $\psi$ , przyjmowanego wg zamieszczanych w literaturze tabel lub obliczonego wg wzoru np. Reinholda:

$$\psi = M \cdot q^{0,567} \cdot t^{0,228} \quad (12)$$

gdzie:

- $q$  — natężenie deszczu,  $\text{dm}^3/\text{s ha}$ ,
- $t$  — czas trwania deszczu, min,
- $M$  — współczynnik charakteryzujący zlewnię i warunki klimatyczne.

Niecała ilość wody spływa od razu do kanału, lecz odbywa się to stopniowo z odległych obszarów zlewni. Zjawisko to uwzględnia czas retencji terenowej  $t_r$ . Zjawisko to można zilustrować następująco:



Rys. 3 Wykres zależności współczynnika dopływu  $f(t)$  od czasu  $t$

$t_R$  — czas retencji terenowej,  
 $t_d$  — czas trwania deszczu,  
 $t_k$  — całkowity czas trwania splotu wód  
 deszczowych do kanału.

Dopływ do kanału  $Q_d(t)$  określa zależność:

$$Q_d(t) = q_d \cdot \psi \cdot F \cdot f(t) \quad [\text{dm}^3/\text{s}] \quad (13)$$

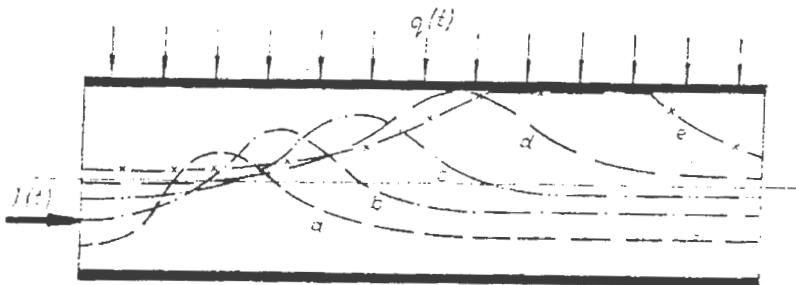
gdzie:  $F$  — pole powierzchni zlewni, ha.  
 Może on być stosowany w modelu jako dopływ punktowy w węźle sieci, ale bardziej korzystne jest zadawanie go jako dopływ na jednostkę długości kanału:

$$q(t) = Q_d(t)/L \quad [\text{dm}^3/\text{m s}] \quad (14)$$

gdzie:  $L$  — długość kanału, m.

Dopływy powodują w kanałach powstawanie i nakładanie się fal.

Rozpatrując odcinek jak na rys. 4, wewnątrz którego przesuwają się fale, zewnętrzny dopływ na jednostkę długości kanału  $q(t)$  powoduje stałe podnoszenie się zwierciadła (ścieków, wód deszczowych) na całej długości odcinka (krzywe a, b, c) aż w końcu może zajść taki przypadek, że maksimum fali osiągnie sklepienie kanału (krzywa d), a nawet wystąpi praca odcinka kanału pod ciśnieniem (krzywa e). Część wód deszczowych  $Q_p$  „nie mieszcząca się” w kanałach (ze względu na ich przepustowość), w których obliczane są przepływy, może być w procesie symulacji zapamiętana i oczekiwać na moment, w którym będzie mogła wpłynąć do sieci.



Rys. 4 Kolejne fazy powstawania przepelnienia kanału

Przepływy ze swobodnym zwierciadłem mogą mieć charakter spokojny, krytyczny i rwący. Określa to liczba Frouda:

### 3. Liczba Frouda i spadek krytyczny

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{B}}}$$

gdzie:

Fr — liczba Frouda

v — średnia prędkość przepływu [m/s]

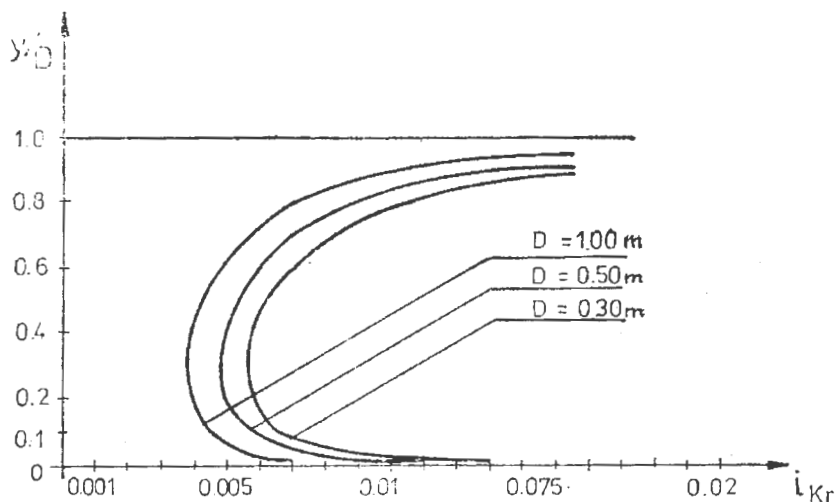
A — pole przekroju czynnego [m<sup>2</sup>]

B — szerokość zwierciadła ścieków [m]

g — przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>].

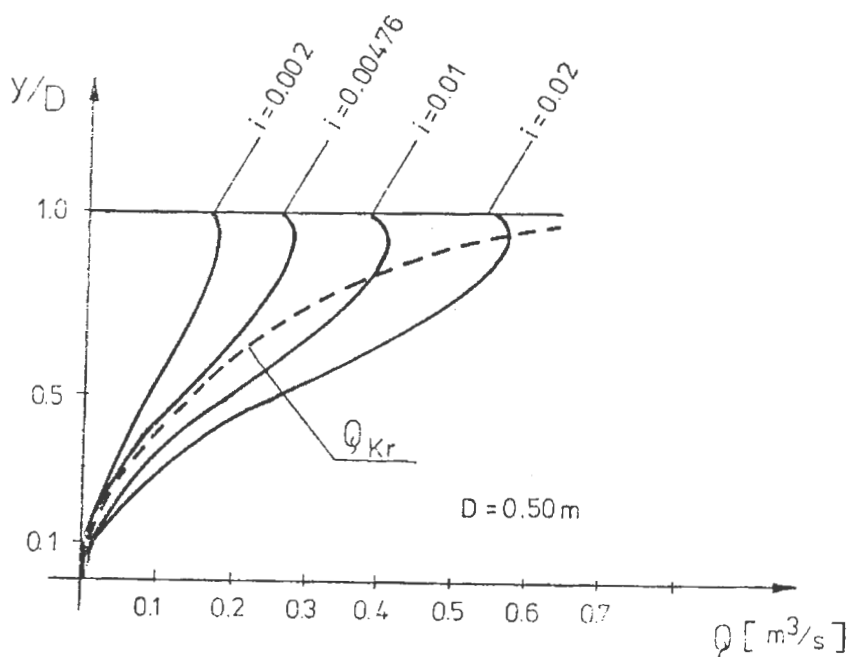
W zależności od wartości liczby Frouda przepływ ma charakter spokojny dla  $Fr < 1$ , krytyczny dla  $Fr = 1$  i rwący dla  $Fr > 1$ .

Przebiegi zmian spadku krytycznego dla wybranych średnic kanału w zależności od stopnia wypełnienia przedstawiają poniższe krzywe.



*Zależność spadku krytycznego od wypełnienia dla wybranych średnic kanałów*

Wartości spadku krytycznego dla wypełnienia zerowego i całkowitego dążą do nieskończoności. Minimalną wartość spadek krytyczny osiąga dla stopnia wypełnienia równego 29,7%. Spadek krytyczny przy tym stopniu wypełnienia nazywany jest spadkiem granicznym. Przepływy ustalone przy spadkach przewodów mniejszych od granicznego są zawsze spokojne. Obrazuje to przykładowy wykres na rys. wykonany dla przewodu o średnicy 0,5 m.



Rys. 2 Zależność natężenia przepływu od wypełnienia kanału dla spadków charakterystycznych



- Charakter przepływu w przewodzie zależy od spadku dna i od napełnienia.
- Szczególne znaczenie dla określenia charakteru przepływu posiada spadek graniczny  $i_g$ .
- Jeżeli w przewodach sieci przepływy są ustalone, to dla spadków dna mniejszych od spadku granicznego występują wyłącznie przepływy spokojne; dla spadku dna rów-

nego spadkowi granicznemu przepływy są spokojne z wyjątkiem napełnienia przejściowego równego 29,7%, przy którym przepływ jest krytyczny; dla spadków dna większych od spadku granicznego, pomiędzy napełnieniami przejściowymi przepływy są rwące, dla napełnień przejściowych krytyczne, a w pozostałym zakresie napełnień spokojne.

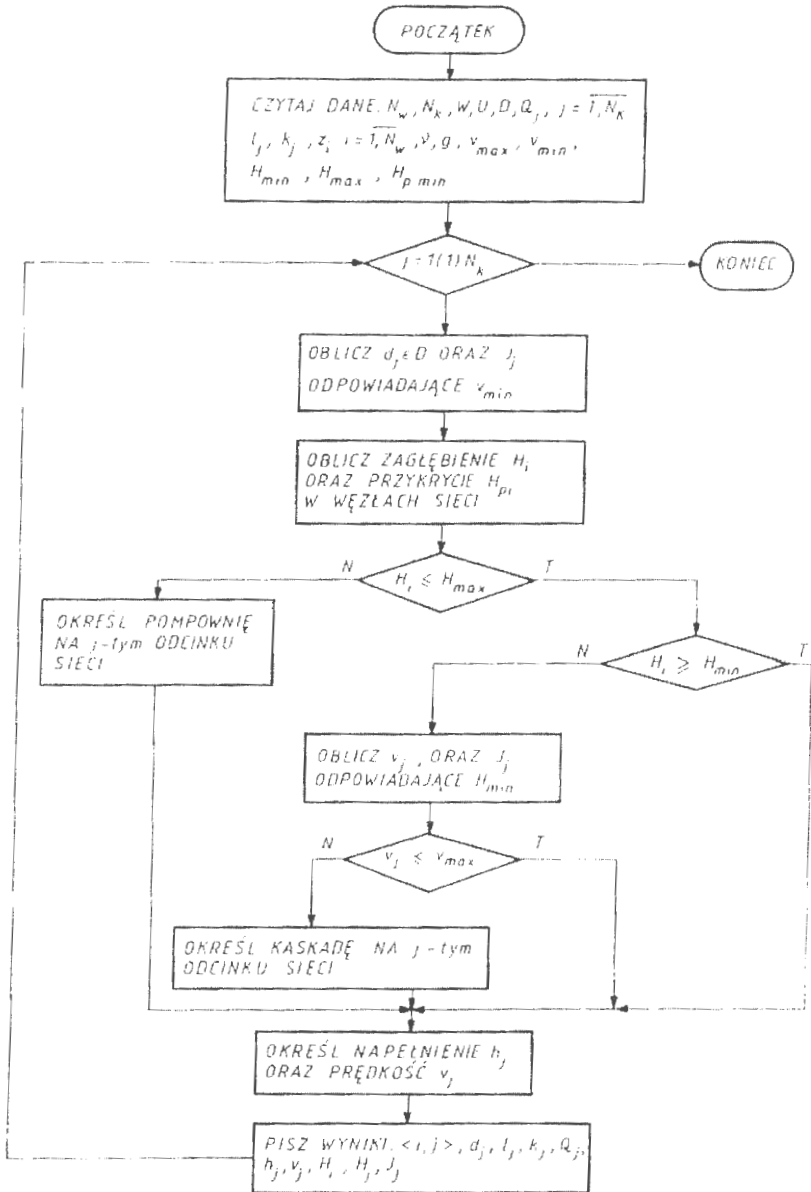
#### 4. Schemat blokowy obliczeń hydraulicznych.

Obliczenie hydrauliczne kanałów polega na:

- wyznaczeniu wymiarów kanału (kształt i wielkość),
- określeniu napełnienia ściekami,
- określeniu średniej prędkości przepływu ścieków w miarodajnym do obliczeń przekroju kanału.

Obliczenia hydrauliczne kanałów przeprowadza się dla poszczególnych odcinków między węzłami, na podstawie określonego dla dolnego węzła maksymalnego przepływu i spadku dna kanału,

przyjmując odpowiednie założenia. Maksymalny przepływ w kanalizacji gospodarczej obliczany jest z bilansu ścieków. Natomiast w kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej obliczany jest metodami stałych lub granicznych natężeń i hydrografów. Algorytm obliczania sieci kanalizacyjnej powinien umożliwić określenie parametrów hydraulicznych (wymiar kanału, napętnienie, średnia prędkość przepływu) jak i wysokościowych kanałów (rzędne i spadki) oraz parametrów obiektów.



Schemat blokowy algorytmu obliczania sieci kanalizacji gospodarczej

Należy podkreślić następujące kroki algorytmu:

a) wczytaj dane, tzn.: liczbę węzłów  $N_w$ , liczbę odcinków  $N_k$ , zbiór węzłów  $W = \{i\}$  dla  $i=1, N_w$ , zbiór odcinków  $U = \{uj\}$  dla  $j=1, N_k$ , zbiór średnic handlowych  $\{D\}$ , długość  $l_j$ , chropowatość  $k_j$   $j$ -tego odcinka, maksymalne natężenie przepływu  $Q_j$  dla  $j=1, N_k$ , rzędne terenu  $z_i$  dla  $i=1, N_w$ , kinematyczny współczynnik lepkości ścieków  $n$ , przyspieszenie ziemskie  $g$ , średnia prędkość minimalna  $v_{min}$  i maksymalna  $v_{max}$ , dopuszczalne zagłębienie minimalne  $H_{min}$  i maksymalne  $H_{max}$  dna kanału, minimalne przykrycie kanału  $H_{pmin}$ ;

b) wykonaj obliczenia hydrauliczne i wysokościowe każdego kanału

## 5. Zależność prędkości przepływu od metody obliczeń

Obliczenia hydrauliczne polegają najczęściej na sprawdzeniu prędkości przepływu i napełnienia w kanale przy znanym (założonym) spadku dna kanału, jego średnicy i przepływie.

Średnią prędkość przepływu ścieków w poprzecznym przekroju kanału można obliczyć przy pomocy wzoru Manninga w postaci:

$$v = K \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot J_E^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

gdzie:  $v$  – średnia prędkość przepływu ścieków w przekroju czynnym w kanale [m/s]

$K$  – współczynnik Manninga [ $m^{1/3}s^{-1}$ ]

$R_h$  – promień hydrauliczny [m]

$J_E$  – spadek dna kanału

Wzór powyższy został wyprowadzony na podstawie równań Bernoulliego dla dwóch przekrojów kanału oddalonych od siebie o pewną odległość  $L$ . We wzorze współczynnik szorstkości Manninga  $K$  stanowi miarę nierówności i jakości wewnętrznych powierzchni kanału. Jego wartość przyjmuje się w zależności od materiału kanału, jego wieku oraz fazy przepływów ścieków.

Wzory Manninga umożliwiają obliczanie strat hydraulicznych na długości kanału. Ze względu na uwikłaną postać wzorów praktyczne obliczenia prowadzi się z wykorzystaniem tablic i nomogramów.

Wzór Manninga stosuje się zarówno dla przekroju kołowego, jak i niekołowego przy napełnieniu całkowitym lub częściowym.

Dla przewodów o przekroju kołowym przy całkowitym napełnieniu prędkość przepływu  $v$  jest wyrażona wzorem Colebrooka- White'a:

$$v = -2 \cdot \sqrt{2gDJ_E} \cdot \log \left( \frac{k}{3,71D} + \frac{2,51v}{D\sqrt{2gDJ_E}} \right) \quad (2)$$

gdzie:  $v$  – średnia prędkość przepływu ścieków w przekroju czynnym w kanale [m/s]

$g$  – stała grawitacji [ $m^2/s$ ]

$D$  – średnica wewnętrzna przewodu [m]

$J_E$  – spadek hydrauliczny

$k$  – współczynnik chropowatości bezwzględnej [m]

$n$  – kinematyczny współczynnik lepkości cieczy [ $m^2/s$ ]

Dla przewodów o częściowym napełnieniu lub dla kanałów o przekroju niekołowym prędkość przepływu jest wyrażona następującym wzorem:

$$v = -2 \cdot \sqrt{8gR_hJ_E} \cdot \log \left( \frac{k}{3,714R_h} + \frac{2,51v}{4R_h\sqrt{8gR_hJ_E}} \right) \quad (3)$$

gdzie:  $R_h$  – promień hydrauliczny [m]

Współczynnik chropowatości bezwzględnej  $k$  zastosowany we wzorze Colebrooka- White'a uwzględnia straty ciśnienia w zależności od materiału, którego jest wykonany przewód, przerwy na połączeniach i osadu powstającego na wewnętrznej powierzchni przewodu poniżej poziomu przepływających ścieków. Jeżeli nie można uniknąć odkładania się osadów, do obliczeń strat ciśnienia powinien być brany zmniejszony przekrój poprzeczny kanału.

Zwykle używa się wartości współczynnik chropowatości bezwzględnej  $k$  z zakresu 0,03 mm do 3 mm. W przypadku współczynnika Manninga  $n$  zalecane wartości są z zakresu od  $70 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  do  $90 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

Ze względu na brak wartości współczynnika Manninga dla kanałów wykonanych z różnego rodzaju tworzyw sztucznych należy przeliczać wartość tego współczynnika w zależności od współczynnika chropowatości bezwzględnej  $k$  zgodnie z zależnością:

$$K = 4\sqrt{g} \cdot \left(\frac{32}{D}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot \log\left(\frac{3,7 \cdot D}{k}\right) \quad (4)$$

Średnica	Spadek	Prędkość przepływu		Różnica	
		wg. Manninga	wg. Colebrooke'a-White'a	bezwzględna	względna
[mm]	[%]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
100	20	2,94	2,99	0,0496	1,66
100	10	2,08	2,11	0,0331	1,57
100	5	1,47	1,49	0,0214	1,43
100	1	0,66	0,66	0,0058	0,88
100	0,5	0,47	0,47	0,0022	0,47
100	0,1	0,21	0,21	0,0025	1,20
200	20	4,67	4,77	0,0970	2,03
200	10	3,3	3,37	0,0665	1,98
200	5	2,33	2,38	0,0450	1,89
200	1	1,04	1,06	0,0164	1,54
200	0,5	0,74	0,75	0,0096	1,28
200	0,1	0,33	0,33	0,0007	0,22
300	20	6,12	6,22	0,1026	1,65
300	10	4,33	4,4	0,0705	1,60
300	5	3,06	3,11	0,0478	1,54
300	1	1,37	1,39	0,0176	1,27
300	0,5	0,97	0,98	0,0105	1,07
300	0,1	0,43	0,43	0,0011	0,24

Tabela 1. Porównanie prędkości przepływu obliczonej wg wzoru Manninga i Colebrooka-White'a dla napełnienia  $h/D=1,0$  i stałych współczynników: Manninga  $K=76,923 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  i chropowatości bezwzględnej  $k=1,5\text{mm}$ .



Średnica	Spadek	Prędkość przepływu		Różnica	
		wg. Manninga	wg. Colebrooke'a - White'a	bezwzględna	względna
[mm]	[%]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
100	20	3,29	3,36	0,0633	1,89
100	10	2,33	2,37	0,0427	1,80
100	5	1,65	1,68	0,0282	1,68
100	1	0,74	0,75	0,0089	1,19
100	0,5	0,52	0,53	0,0043	0,82
100	0,1	0,23	0,23	0,0015	0,66
200	20	5,23	5,33	0,1025	1,92
200	10	3,70	3,77	0,0704	1,87
200	5	2,61	2,66	0,0478	1,79
200	1	1,17	1,19	0,0176	1,48
200	0,5	0,83	0,84	0,0105	1,25
200	0,1	0,37	0,37	0,0011	0,29
300	20	6,85	6,95	0,0953	1,37
300	10	4,84	4,91	0,0653	1,33
300	5	3,43	3,47	0,0442	1,27
300	1	1,53	1,55	0,0159	1,03
300	0,5	1,08	1,09	0,0093	0,85
300	0,1	0,48	0,49	0,0005	0,11

Tabela 2. Porównanie prędkości przepływu obliczonej wg wzoru Manninga i Colebrooka-White'a dla napętnienia  $h/D=0,7$  i stałych współczynników: Manninga  $K=76,923 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  i chropowatości bezwzględnej  $k=1,5\text{mm}$ .

Średnica	Spadek	Prędkość przepływu		Różnica	
		wg. Manninga	wg. Colebrooke'a-White'a	bezwzględna	względna
[mm]	[%]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
100	20	3,22	3,21	0,0090	0,28
100	10	2,28	2,27	0,0094	0,41
100	5	1,61	1,6	0,0096	0,60
100	1	0,72	0,71	0,0098	1,38
100	0,5	0,51	0,5	0,0097	1,95
100	0,1	0,23	0,22	0,0092	4,23
200	20	5,08	5,07	0,0084	0,17
200	10	3,59	3,59	0,0090	0,25
200	5	2,54	2,53	0,0094	0,37
200	1	1,14	1,13	0,0098	0,87
200	0,5	0,8	0,79	0,0098	1,23
200	0,1	0,36	0,35	0,0095	2,72
300	20	6,61	6,6	0,0080	0,12
300	10	4,67	4,66	0,0087	0,19
300	5	3,3	3,29	0,0092	0,28
300	1	1,48	1,47	0,0097	0,66
300	0,5	1,05	1,04	0,0098	0,95
300	0,1	0,47	0,46	0,0096	2,10

Tabela 3. Porównanie prędkości przepływu obliczonej wg wzoru Manninga i Colebrooke-White'a dla napełnienia  $h/D=1,0$  i współczynnika Manninga  $K$  zależnego od średnicy  $D$  i chropowatości bezwzględnej  $k=1,0$

## Literatura

1. J.Chudzicki, S.Sosnowski: Instalacje kanalizacyjne. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. Z o.o., Warszawa 2004
2. P.Mizgalewicz, K.Knapik, A.Wieczysty: Analiza pracy sieci kanalizacyjnych przy zastosowaniu EMC. Ochrona Środowiska nr 434/3-4 (20-21), 1984.
3. E. Wołoszyn: Matematyczny model przepływów w sieci kanalizacyjnej. Archiwum Hydrotechniki, tom XXVI, zeszyt 4, 1979.

4. W.,. Niedzielski: Charakter przepływu w sieci kanalizacji deszczowej. Ochrona Środowiska, nr 434/3-4 (20-21), 1984









the 1990s, the number of people who have been employed in the public sector has increased in all countries.

The public sector has become a major employer in all countries. In the United States, the public sector has grown from 11.5% of the total workforce in 1970 to 17.5% in 1995. In the United Kingdom, the public sector has grown from 12.5% of the total workforce in 1970 to 23.5% in 1995. In Germany, the public sector has grown from 15.5% of the total workforce in 1970 to 25.5% in 1995. In France, the public sector has grown from 18.5% of the total workforce in 1970 to 28.5% in 1995. In Japan, the public sector has grown from 21.5% of the total workforce in 1970 to 31.5% in 1995.

The growth of the public sector has been driven by a number of factors. One major factor has been the increasing demand for public services, such as education, health care, and social security. Another major factor has been the increasing demand for public employees, such as teachers, nurses, and social workers. A third major factor has been the increasing demand for public infrastructure, such as roads, bridges, and public housing.

The growth of the public sector has also been driven by the increasing demand for public employees in the private sector. As the private sector has grown, it has created a demand for public employees to provide services to the private sector. For example, the private sector has created a demand for public employees to provide services such as security, maintenance, and transportation.

The growth of the public sector has also been driven by the increasing demand for public employees in the non-profit sector. As the non-profit sector has grown, it has created a demand for public employees to provide services to the non-profit sector. For example, the non-profit sector has created a demand for public employees to provide services such as education, health care, and social services.

The growth of the public sector has also been driven by the increasing demand for public employees in the government sector. As the government sector has grown, it has created a demand for public employees to provide services to the government sector. For example, the government sector has created a demand for public employees to provide services such as law enforcement, fire protection, and public administration.

The growth of the public sector has also been driven by the increasing demand for public employees in the military sector. As the military sector has grown, it has created a demand for public employees to provide services to the military sector. For example, the military sector has created a demand for public employees to provide services such as maintenance, transportation, and food service.