

## DYNAMICZNE MODELE PRZEPLYWU ŚCIEKÓW W MIEJSKIM SYSTEMIE KANALIZACYJNYM<sup>1</sup>

LUCYNA BOGDAN  
GRAŻYNA PETRICZEK  
Instytut Badań Systemowych PAN

### Streszczenie

*W pracy przedstawiono metody modelowania sieci kanalizacyjnej i algorytm obliczeń hydraulicznych dla podanych metod. W oparciu o równanie ciągłości Saint –Venanta i wzór Manninga opisujący straty hydrauliczne uwzględniając zależności geometryczne w przewodzie kołowym wyprowadzono równania opisujące dynamikę zmiany wysokości napełnienia w sieci kanalizacyjnej. Dynamika zmian napełnienia oraz natężeń przepływów zależy od parametrów hydraulicznych takich jak: kształt, wymiar kanału, spadek dna oraz szorstkość. W oparciu o wyprowadzone zależności zaproponowano algorytm obliczania sieci kanalizacyjnej.*

**Słowa kluczowe:** sieć kanalizacyjna, model matematyczny przepływu ścieków, algorytm modelowania sieci.

### 1. Wstęp

W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z modelowaniem sieci kanalizacyjnej. Przedstawiono równania opisujące przepływy ścieków w sieci kanalizacyjnej. Zaprezentowano metody modelowania odcinków sieci i całej sieci oraz przedstawiono algorytm obliczeń hydraulicznych dla podanych metod. W oparciu o równanie ciągłości Saint –Venanta i wzór Manninga opisujący straty hydrauliczne uwzględniając zależności geometryczne w przewodzie kołowym wyprowadzono równania opisujące dynamikę zmiany wysokości napełnienia w sieci kanalizacyjnej. Dla wyprowadzonych zależności przedstawiono schemat obliczeń podstawowych zmiennych sieci (przepływów ścieków, wysokości napełnień oraz prędkości przepływów) uwzględniając dynamikę ich zmian. Zasygnalizowano także zagadnienia biodegradacji ścieków w systemach kanalizacyjnych.

### 2. Uprozczone modele przepływu ścieków

Ogólna postać przepływu ścieków w sieci kanalizacyjnej jest opisana układem równań Saint-Venanta (równanie ciągłości, równanie dynamiki)

Przedstawione poniżej dwie wersje modelu dotyczą sytuacji sieci grawitacyjnej, rozgałęzionej, podzielonej węzłami na segmenty. Węzłami są punkty, w których następuje: połączenie kilku segmentów lub gałęzi sieci, zmiana parametrów sieci lub dopływ ścieków do sieci (studzienka, wpusty deszczowe, studzienka połączeniowa). W węzłach połączeniowych spełnione są równania ciągłości przepływu oraz warunek zgodności poziomów zwierciadła ścieków w kanałach łączących.

---

<sup>1</sup> Artykuł napisany w ramach projektu badawczego MNiSW nr NN 514 2977 33.

Przyjęto, że segmenty charakteryzują się stałymi parametrami hydraulicznymi takimi jak: kształt, wymiar kanału, spadek dna oraz szorstkość. Dopływ ścieków odbywa się punktowo poprzez studzienki i ma charakter wolnozmienny w czasie i przestrzeni.

W tym punkcie przedstawiono uproszczone wersje modelu pracy sieci kanalizacyjnej oparte na równaniu ciągłości (1) i równaniu uwzględniającym straty hydrauliczne, opisane wzorem Manninga. Poniżej przedstawiono zestaw zależności opisujących ten model.

a) równanie ciągłości

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

b) wzór Manninga

$$Q = \frac{1}{N} R^{2/3} \cdot J^{1/2} \cdot A \quad (2)$$

gdzie:

A – pole przekroju, m

Q – natężenie przepływu, dm<sup>3</sup>/m

q – boczny dopływ na jednostkę długości, dm<sup>3</sup>/s\*m

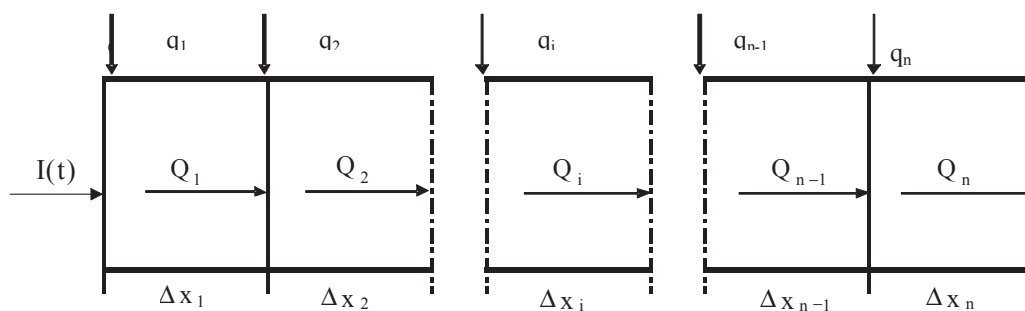
$v = \frac{Q}{A}$  – średnia prędkość przepływu, m/s

J – spadek dna kanału

R – promień hydrauliczny m

N – współczynnik szorstkości

Opis metody przeprowadzono na podstawie odcinka kanału przedstawionego na Rysunku 1.



Rys. 1. Schemat odcinka kanału

Kanał ten podzielony jest na "n" części o długościach odpowiednio  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$ . Zmiany przepływów w poszczególnych segmentach można zapisać w postaci równań:

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 &= Q_1 - I(t) - q_1 \\ \Delta Q_i &= Q_i - Q_{i-1} - q_i \quad i=1, \dots, L \end{aligned} \quad (3a)$$

Przy założeniu, że współczynnik szorstkości N oraz spadek dna kanału J są stałe na całej długości rozpatrywanego odcinka zależność określająca natężenie przepływu ma postać:

$$Q_i = \frac{1}{N} R_i^{2/3} \cdot J_i^{1/2} \cdot A_i \quad (3b)$$

Po przekształceniu równania (1) do postaci:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta x} + \frac{\Delta A}{\Delta t} = 0 \quad (4)$$

i po połączenie z równaniami (3a) otrzymujemy układ równań określający zmianę pola przekroju  $\Delta A$  w czasie  $\Delta t$ :

$$\frac{\Delta A_i}{\Delta t} = \frac{Q_{i-1} - Q_i}{\Delta x_i} + \frac{q_i(t)}{\Delta x_i} \quad (5)$$

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

$$A_i(t + \Delta t) = A_i(t) + \frac{\Delta A_i}{\Delta t} \cdot \Delta t \quad (6a)$$

po połączeniu równań (5) i (6a) otrzymano:

$$A_i(t + \Delta t) = A_i + \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \cdot (Q_{i-1} - Q_i) + q_i(t) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \quad (6b)$$

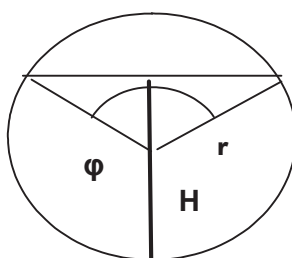
Model przepływu w tym przypadku przedstawiony jest zależnościami (3a), (3b) oraz (6b). W punktach połączeń kanałów dane są równania bilansu przepływów w węźle tzn.  $\sum Q_m = 0$ .

A więc w każdej chwili czasu  $t$  dla każdego odcinka  $i$  (od  $i=1$  aż do  $i=N-1$ ) obliczany jest przepływ, a następnie pole przekroju czynnego  $A$  w następnym momencie czasu  $t+\Delta t$ .

Wartości zmiennych w węzłach brzegowych  $i=0$  i  $i=N$  wyznacza się stosując równania bilansu przepływów w węźle tzn.  $\sum Q_m = 0$  oraz równania zgodności zwierciadła.

Druga przedstawiona poniżej wersja modelu związana jest z obliczaniem wysokości napełnienia  $H$ . Dla kanałów o przekroju kołowym można wykorzystać zależność pola przekroju czynnego  $A$  od wysokości napełnienia  $H$ .

Przyjmując oznaczenia jak na Rysunku 2.



Rys. 2. Zależności między wielkościami w kanale o przekroju kołowym

gdzie:  $H$  – wysokość napełnienia  
 $r$  – promień kanału kołowego  
 $d$  – średnica kanału  
 $\varphi$  – kąt środkowy

otrzymujemy następujące zależności:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{d^2}{8} \left( \frac{\pi \cdot \varphi}{180} - \sin \varphi \right) \quad (7)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{H(d-H)}}{H - \frac{d}{2}}$$

Z zależności (7) wynika, że  $A=f(H)$  a więc że:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (8a)$$

gdzie:

$$f(H_i) = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{d^2}{8} \left( \frac{\pi \cdot \varphi}{180} - \sin \varphi \right) \quad (8b)$$

Po odpowiednich przekształceniach otrzymujemy:

$$\frac{\partial f}{\partial H} = \frac{d^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{H(d-H)}} \left( \frac{\pi}{180} - \cos(\varphi) \right) \quad (9a)$$

gdzie:

$$\varphi = 2 \cdot \arctg \left( \frac{\sqrt{Hd - H^2}}{H - \frac{d}{2}} \right) \quad (9b)$$

Z równania postaci (4) oraz z zależności (8a) przekształconej do postaci różnicowej otrzymujemy:

$$\frac{\Delta Q_i}{\Delta x_i} + \frac{d_i^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{H_i(d_i - H_i)}} \left( \frac{\pi}{180} - \cos(\varphi_i) \right) \cdot \frac{\Delta H_i}{\Delta t} = 0 \quad (10a)$$

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta t} = \frac{H_i(t + \Delta t) - H_i(t)}{\Delta t} \quad (10b)$$

Przekształcenie powyższej zależności pozwala na określenie zmiany wysokości napełnienia  $H$  w czasie  $\Delta t$ :

$$H_i(t + \Delta t) = H_i(t) + \frac{4\sqrt{H_i(t) \cdot (d_i - H_i(t))}}{d_i^2 \cdot \left( \frac{\pi}{180} - \cos(\varphi_i(t)) \right)} \cdot \frac{(Q_{i-1}(t) - Q_i(t))}{\Delta x_i} \cdot \Delta t + \frac{q_i(t)}{\Delta x_i} \cdot \Delta t \quad (11)$$

gdzie:  
 $d_i$  – średnica i-tego odcinka kanału  
 $\varphi_i$  – dane zależnością (8b)  
 $\Delta x_i$  – długości odcinków kanałów

$\Delta t$  – długość odcinka czasu

W tym modelu dla chwili czasu  $t$  i dla każdego odcinka  $i$  (od  $i=1$  aż do  $i=N-1$ ) obliczany jest przepływ  $Q_i$  i a następnie znając przepływy oraz wysokości napelnień  $H_i$  dla odcinka czasu  $t$  obliczamy wysokości napelnień w następnym momencie czasu  $t+\Delta t$  według wzoru (10) – (8b).

Wykorzystując obliczony wypływ z kanału  $Q_n$  jako dodatkowy dopływ do następnego przewodu, można symulować powyższą metodą dowolne fragmenty sieci. Takie rozwiązanie umożliwia fragmentaryczne traktowanie wybranych obszarów sieci a następnie poprzez łączenie fragmentów sieci modelowanie całej 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. przepływy 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 otrzymanych wyników itp.

### 3. Obliczanie natężenia dopływów

Do danego odcinka sieci dopływają zarówno ścieki bytowo – gospodarcze i przemysłowe jak i deszczowe. W zależności od rodzaju ścieków natężenie dopływających ścieków wyraża się różnymi zależnościami.

Dla ścieków bytowo – gospodarczych i przemysłowych rozważa się maksymalny godzinowy dopływ ścieków  $Q_{di}$  do danego odcinka i może on być wyrażony następującą zależnością:

$$Q_{di} = \frac{N_{hmax} M \cdot q_{sr}}{24} \quad (12)$$

gdzie:

$M$  – liczba mieszkańców przypadająca na dany odcinek sieci

$q_{sr}$  – średni jednostkowy odpływ ścieków zależny od wielkości jednostki osadniczej

$N_{hmax}$  – współczynnik nierównomierności dobowej

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.

Przepływ ścieków opadowych można obliczać według następującego wzoru:

$$Q_d = q_d \cdot \Psi \cdot F \cdot \tau \quad (13)$$

w którym:

$Q_d$  – spływ ścieków deszczowych ze skanalizowanego terenu, [ $dm^3/l/s$ ],

$F$  – powierzchnia zlewni, powierzchnia terenu skanalizowanego tzn. powierzchnia z której ścieki spływają do określonego odcinka kanału, [ha],

$\Psi$  – współczynnik spływu powierzchniowego, wyrażający stosunek ilości cieków deszczowych, które spłynęły do kanalizacji, do ilości ścieków deszczowych, które spadły na dany teren,

$\tau$  – współczynnik opóźnienia

$q_d$  – natężenie deszczu w [ $\text{dm}^3/\text{s ha}$ ], wyrażającą objętość deszczu w  $\text{dm}^3$ , która spadła na powierzchnię 1 ha w czasie 1 s

Niecała ilość wody od razu spływa do kanału, lecz odbywa się to stopniowo z coraz bardziej odległych fragmentów zlewni. Zjawisko to uwzględnia czas retencji terenowej, który może być przyjmowany według tabel lub na podstawie takich czynników, jak kształt zlewni, położenie kanału, spadek terenu itp.

Ilość wody, która nie odpłynie 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 Reinholda:

$$\Psi = M \cdot q^{0.567} \cdot t_d^{0.228} \quad (14)$$

gdzie:  $q$  – natężenie deszczu ( $\text{dm}^3/\text{h}$ )

$t_d$  – czas trwania deszczu (min)

$M$  – współczynnik charakteryzujący zlewnię i warunki klimatyczne

Dysponując planem sieci kanalizacji deszczowej należy ustalić powierzchnię zlewni z uwzględnieniem ukształtowania terenu, aby zostały zachowane naturalne kierunki spływu ścieków opadowych do kanałów. Następnie dla poszczególnych terenów należy dobrać wartości współczynnika spływu  $\Psi$ . Wartości współczynnika spływu należy przyjmować zależnie od gęstości zabudowy lub szczelności pokrycia powierzchni zlewni.

Natężenie deszczu miarodajnego obliczane jest na podstawie parametrów, określanych z wieloletnich obserwacji meteorologicznych. Parametrami charakteryzującymi deszczę, są: czas trwania,  $t$  [min], wysokość opadu,  $H$  [mm], natężeniem,  $I = H/t$ , [mm/min], zasięg,  $F$  [ha], prawdopodobieństwem pojawiania się  $P(\%)$  lub częstotliwością występowania  $C = 100/P$ , w latach. Istnieje szereg zależności określających związek pomiędzy natężeniem, czasem trwania i prawdopodobieństwem występowania deszczu.

Wśród najczęściej stosowanych w projektowaniu kanałów jest metoda granicznych natężeń stosująca wzór Błaszczyka na natężenie spływu jednostkowego deszczu miarodajnego w postaci

$$q_d = \frac{6,63 \sqrt[3]{H^2 c}}{t_d^{0,67}} \quad (15)$$

w którym:

$H$  – średni opad roczny, [mm].

$q_d$  – natężenie deszczu ( $\text{dm}^3/\text{h}$ )

$c$  – częstotliwość występowania deszczu (lata)

$t_d$  – czas trwania deszczu (min)

$p$  – częstotliwość pojawienia się deszczu (%),  $p=100/c$

Czas trwania deszczu miarodajnego  $t_d$  można obliczyć z następującego wzoru:

$$t_d = 1,2 \cdot \sum t_p + t_k = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{v_i} + t_k \quad (16a)$$

W zmodyfikowanej metodzie granicznych natężeń do wzoru (15a) dodaje się człon uwzględniający dodatkowo retencję sieci i terenu zlewni powyżej obliczanego przekroju

$$t_w = \frac{\alpha}{60} \sum_{i=1}^N \frac{A_i L_i + V_i F_i}{Q_{di}} \quad (16b)$$

gdzie:  $t_p$  – czas przepływu przez poszczególne odcinki kanału od górnego końca sieci do punktu

dla którego wykonywane są obliczenia, [min],

$L_i$  – długość  $i$ -tego odcinka kanału

$v_i$  – średnia prędkość przepływu w  $i$ -tym odcinku

$t_k$  – czas koncentracji terenowej

$A_i$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego kanału

$F_i$  – pole powierzchni zlewni bezpośredniej  $i$ -tego odcinka łącznie z kanałami bocznymi dochodzącymi do tego odcinka

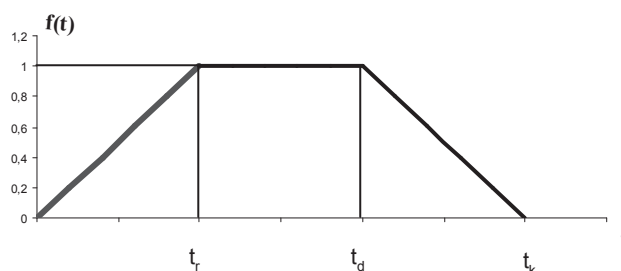
$V_i$  – wskaźnik objętości kanałów bocznych i retencji terenowej na  $i$ -tym odcinku

Całkowite natężenie przepływu oblicza się jako sumę natężeń przepływu ścieków bytowo-gospodarczych, przemysłowych i ścieków deszczowych. Do tego natężenia dodawany jest ewentualny odpływ z przelewów burzowych, umiejscowionych na odcinkach sieci powyżej rozpatrywanego odcinka sieci. Czas trwania deszczu miarodajnego obliczany jest z uwzględnieniem sieci powyżej odcinka.

Drugim sposobem wyznaczania natężenia deszczu miarodajnego jest metoda stałych natężeń, w której przyjmuje się czas trwania deszczu  $t_d = 10$  min i częstotliwość  $c=2$ . Współczynnik opóźnienia  $\tau$ , zależny od powierzchni zlewni oraz jej spadku i kształtu określony jest wzorem

Burklego-Zieglera:  $\tau = \frac{1}{\sqrt[n]{F}}$ . Współczynnik  $\tau$  może przyjmować wartości od 2 do 8 (większe

dla zlewni zwartych i o dużych spadkach). Zjawisko retencji terenowej można również uwzględnić przez zastosowanie współczynnika  $f(t)$  zależnego od czasu.



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

gdzie:  $t_R$  – czas retencji terenowej

$t_d$  – czas trwania deszczu

$t_k$  – całkowity czas trwania splywu wód deszczowych do kanału

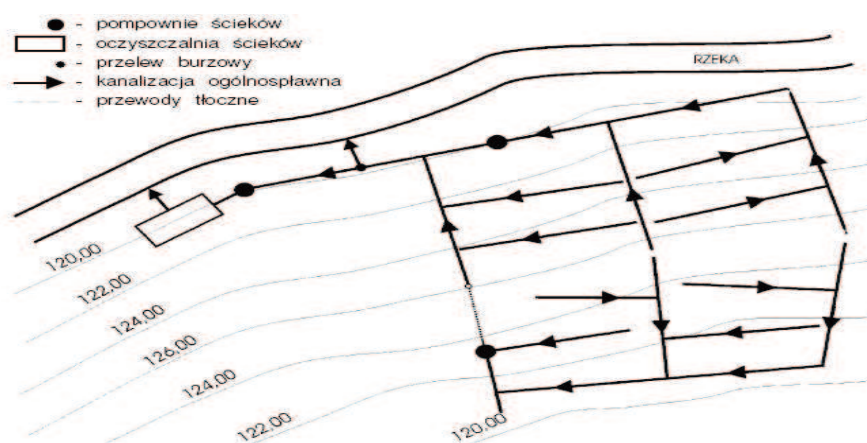
Dla tak zadanej funkcji  $f(t)$  dopływ do kanału  $Q_d(t)$  określa zależność:

$$Q_d(t) = q_d \cdot \psi \cdot F \cdot f(t) \quad (17)$$

Dopływ  $Q_d$  obliczony według przedstawionych metod może być stosowany w modelu jako dopływ punktowy w węźle sieci, ale korzystniejsze jest zadawanie go jako dopływu na jednostkę długości kanału.

#### 4. Algorytm modelowania sieci kanalizacyjnej

Przedstawiony poniżej algorytm modelowania dotyczy sytuacji sieci sanitarnej lub ogólnospławnej przedstawionej na Rysunku 4, rozgałęzionej, podzielonej węzłami na segmenty.



Rys. 4. Schemat systemu kanalizacji ogólnospławnej lub sanitarnej

Algorytm oparty jest na przedstawionym wcześniej modelu pracy sieci kanalizacyjnej opisanym zależnościami (3b) i (11). W modelu tym wyznacza się z równań ciągłości wysokości napęgnięć poszczególnych segmentów sieci w określonych przedziałach czasowych.

Przedstawiony w pracy algorytm obliczania sieci kanalizacyjnej przeprowadzony jest na podstawie następujących podstawowych danych:

- typ sieci – ogólnospławna, sanitarna
- struktura sieci kanalizacyjnej – liczba odcinków, typy kanałów: grawitacyjne i ciśnieniowe, liczba i rodzaj węzłów,
- rozpatrywanego horyzontu czasu (podział na przedziały  $\Delta t$ )
- maksymalny dopływ ścieków do poszczególnych węzłów sieci,
- spadek dna kanału., wymiary kanału



Zadaniem algorytmu jest (dla każdego odcinka sieci oraz ustalonych przedziałów czasu):

- wyznaczenie wysokości napełnień ściekami, • ustalenie prędkości przepływu, • wyznaczenie natężeń przepływów na odcinkach.

Przyjęto, że segmenty charakteryzują się stałymi w czasie parametrami hydraulicznymi takimi jak: kształt, wymiar kanału, spadek dna oraz szorstkość. Dopływ ścieków odbywa się punktowo w węzłach sieci.

Przyjęto, że w większości segmentów sieć jest grawitacyjna, z wyjątkiem przypadków istnienia pompowni z przewodami tłocznymi (odcinki kanałów działające po ciśnieniu).

Poniżej przedstawimy podstawowe składowe algorytmu symulacyjnego obliczeń dla kanałów o przekroju kołowym.

**Krok 1.** Należy wczytać dane dotyczące struktury sieci tzn.: liczbę węzłów NW, liczbę odcinków NO, zbiór węzłów  $W = \{j\}$  zbiór odcinków  $U = \{i\}$ , zbiór średnic kanałów  $\{d_i\}$ , długości odcinków  $\Delta_i$ , spadki dna dla poszczególnych odcinków  $i=1, \dots, NO$ , współczynniki szorstkości  $N_i$   $i$ -tego odcinka, oraz wartości początkowe: natężenia przepływów  $Q_i$  w poszczególnych segmentach, wysokości napełnień  $H_i$  w poszczególnych segmentach  $\Delta_i$   $i=1, \dots, NO$  kinematyczny współczynnik lepkości ścieków  $n$ . Należy również podać dane dotyczące odcinków czasu  $t_j = t_{j-1} + \Delta t$   $j=1, \dots, T$

Dla danego okresu czasu  $t_j = t_{j-1} + \Delta t$   $j=1, \dots, T$

**Krok 2.** Obliczyć natężenia dopływów ścieków  $q_i(t)$  do poszczególnych węzłów sieci. Do danego odcinka sieci dopływają zarówno ścieki bytowo – gospodarcze i przemysłowe jak i deszczowe. W zależności od rodzaju ścieków natężenie dopływających ścieków wyraża się różnymi zależnościami omówionymi punkcie 2 artykułu.

**Krok 3.** Dla obliczonego zgodnie z zależnością (11) i (9b) napełnienia  $H_i(t)$  obliczamy pola powierzchni przekrojów czynnych  $A_i$  oraz promienie hydrauliczne  $R_i$  według wzoru:

Dla poszczególnych odcinków sieci  $\Delta_i$ ,  $i=1, \dots, NO$

$$A_i(t) = \frac{\pi d_i^2}{4} - \frac{d_i^2}{8} \left( \frac{\pi}{180} \cdot \varphi_i(t) - \sin(\varphi_i(t)) \right) \quad (18)$$

$$R_i(t) = \frac{A_i(t)}{U_i(t)} = \frac{\pi d_i^2 - \frac{\pi d_i^2}{360} \cdot \varphi_i(t) + \frac{d_i^2}{2} \cdot \sin(\varphi_i(t))}{4 \cdot \left( \pi - \frac{\pi}{180} \cdot \varphi_i(t) \right)} \quad (19a)$$

$$\varphi_i(t) = 2 \cdot \arctg \left( \frac{\sqrt{H_i(t) \cdot (d_i - H_i(t))}}{H_i(t) - \frac{d_i}{2}} \right) \quad (19b)$$

gdzie:  $A_i$  – pole powierzchni przekroju czynnego poszczególnych odcinków  
 $U_i$  – obwód zwilżony poszczególnych odcinków  
 $d_i$  – średnica  $i$ -tego odcinka kanału

**Krok 4.** Znając promienie hydrauliczne  $R_i$  oraz pola powierzchni przekrojów czynnych  $A_i$  obliczamy dla poszczególnych odcinków sieci  $\Delta_i \quad i=1, \dots, NO$

a). natężenia przepływów  $Q_i$

$$Q_i(t) = \frac{1}{N_i} (R_i(t))^{2/3} \cdot J_i^{1/2} \cdot A_i(t) \quad (20)$$

b). prędkości przepływów  $v_i$  według wzoru:

$$v_i(t) = \frac{1}{N_i} (R_i(t))^{2/3} \cdot J_i^{1/2} \quad (21)$$

gdzie:  $N_i$  – współczynniki szorstkości  $i$ -tego odcinka

$J_i$  – spadki dna kanału poszczególnych segmentów sieci

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  $N$  zgodnie z zależnością:

$$K_i = 4\sqrt{g} \cdot \left(\frac{32}{d_i}\right)^{1/6} \cdot \log\left(\frac{3,7 \cdot d_i}{N_i}\right) \quad (22)$$

Obliczenia są realizowane kolejno dla każdego odcinka sieci, zaczynając od położonego najdalej od wylotu sieci, a kończąc na obliczaniu odcinka najbliższego oczyszczalni ścieków

**Krok 5.** W każdym węźle sieci oblicza się równania bilansu przepływów  $\sum_{j \neq i} Q_j = 0$  oraz

warunek zgodności poziomów zwierciadła ścieków.

**Krok 6.** Dla kanałów tłocznych przy zadanym przepływie  $Q_i(t)$  oblicza się straty ciśnienia  $p_i$  z zależności:

$$p_i(t) = \frac{\lambda_i}{\pi^2 d_i^5 \cdot g} \cdot 8\Delta_i \cdot Q_i^2(t) + \frac{8}{\pi^2 d_i^4 \cdot g} \cdot \xi_i \cdot Q_i^2(t) \quad (23a)$$

gdzie:  $\lambda_i$  – współczynnik strat liniowych dla  $i$ -tego odcinka obliczany przy pomocy wzoru Colebrooka-White'a lub Waldena

$L_i$  – długość rozpatrywanego odcinka

$\xi_i$  – współczynnik strat lokalnych w przewodzie

Z uwagi na uwikłaną zależność współczynnika  $\lambda$  we wzorze Colebrooka-White'a do obliczenia przybliżonej wartości współczynnika  $\lambda$  stosuje się wzór Waldena postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} = -2 \cdot \log\left(\frac{6,1}{Re^{0,915}} + 0,268 \cdot \varepsilon_i\right) \quad (23b)$$

gdzie:  $\varepsilon_i$  – chropowatość względna  $\varepsilon_i = \frac{N_i}{d_i}$

$$\text{Re} - \text{liczba Reynoldsa } \text{Re} = \frac{v_i \cdot d_i}{\nu_i}$$

$\nu_i$  – kinetyczny współczynnik lepkości  
 $v_i$  – prędkość przepływu

**Krok 7.** Znając wartości natężeń przepływów  $Q_i(t)$  we wszystkich segmentach rozpatrywanej sieci wyznaczamy wysokości napełnień kanałów w następnym okresie czasu  $t_{j+1} = t_j + \Delta t$  według równania:

$$H_i(t + \Delta t) = H_i(t) + \frac{4\sqrt{H_i(t) \cdot (d_i - H_i(t))}}{d_i^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180} - \cos(\varphi_i(t))\right)} \cdot \frac{(Q_{i-1}(t) - Q_i(t))}{\Delta x_i} \cdot \Delta t + \frac{q_i(t)}{\Delta x_i} \cdot \Delta t \quad (24)$$

Obliczenia są realizowane kolejno dla każdego odcinka sieci  $\Delta_i$ , zaczynając od położonego najdalej od wylotu sieci, a kończąc na obliczaniu odcinka najbliższego oczyszczalni ścieków. Po obliczeniu wysokości napełnień we wszystkich segmentach sieci przechodzimy do Kroku 2 rozpatrywanego algorytmu.

## 5. Biodegradacja ścieków w kanalizacji

Badania prowadzone w ciągu ostatnich kilkunastu lat zmieniają sposób postrzegania zjawisk związanych z systemem kanalizacyjnym i z działaniem oczyszczalni ścieków z częścią biologiczną. Zauważono, że procesy mikrobiologiczne, które wiążano z konkretnymi urządzeniami oczyszczalni ścieków, zachodzą w systemie kanalizacyjnym przed wejściem do oczyszczalni. W efekcie do oczyszczalni mogą wpływać ścieki o parametrach różnych od założonych przy projektowaniu oczyszczalni. Aby skutecznie opisać przemiany zachodzące w systemie kanalizacyjnym przydatnym może się okazać model matematyczny opisujący procesy tlenowe i beztlenowe powodujące biodegradację ścieków. Wydaje się, że przemiany biochemiczne zachodzące w systemie kanalizacyjnym należy traktować jako jeden z elementów procesu oczyszczania ścieków i traktować jako proces technologiczny oczyszczalni. Wobec tego systemy kanalizacyjne powinny być traktowane jako bioreaktory wstępnego podczyszczania ścieków oraz część zintegrowanej gospodarki wodno-ściekowej.

### Bibliografia

- [1] Biedugnis S.: *Metody informatyczne w wodociągach i kanalizacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [2] Bogdan L., Petriczek G.: Algorytmy komputerowe obliczania sieci kanalizacyjnych. *Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą*, ss. 23–35, Bydgoszcz 2008.
- [3] Chudzicki J., Sosnowski S.: *Instalacje kanalizacyjne*. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o, Warszawa 2004.
- [4] Łagód G., H.Sobczuk H., Suchorab Z.: *Kolektory kanalizacyjne jako część kompleksowego układu oczyszczania ścieków*. *Mat.konf.II Kongresu Inżynierii Środowiska, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, vol.32, t.1, Warszawa 2005, s. 835–843.

- [5] Mizgalewicz P., Knapik K., Wieczysty A.: *Analiza pracy sieci kanalizacyjnych przy zastosowaniu EMC*. Ochrona Środowiska nr 434/3–4 (20–21), 1984.
- [6] Niedzielski W.: *Charakter przepływu w sieci kanalizacji deszczowej*. Ochrona Środowiska, nr 434/3–4 (20–21), 1984.
- [7] Wartalski J.: *Komputerowe metody projektowania i analizy hydraulicznej sieciowych układów kanalizacyjnych*. Ochrona Środowiska, nr 434/3–4 (20–21), 1984.
- [8] Serek M.: *Zastosowanie mikrokomputerów do obliczania sieci kanalizacji deszczowej*. Ochrona Środowiska, nr 488/1–2 (27–28), 1986.

#### DYNAMICAL SEWAGE FLOW MODELS IN MUNICIPAL WASTEWATER NETWORKS

##### Summary

*In the paper the modelling methods of sewage network are presented as well as the calculation algorithm for this problem. The problem of dynamical filling of the canal is considered and the simulation algorithm for this case is shown.*

**Keywords:** the sewage network, the mathematical models of sewage flow, the algorithm of sewage network modeling.

Lucyna Bogdan  
Grażyna Petriczek  
Instytut Badań Systemowych PAN  
e-mail: bogdan@ibspan.waw.pl  
petriczek@ibspan.waw.pl