

mgr inż. Paweł Mizgalewicz
dr inż. Krzysztof Knapik
prof. dr hab. inż. Artur Wieczysty

Instytut Inżynierii Sanitarnej i Ochrony Środowiska
Politechniki Krakowskiej

ANALIZA PRACY SIECI KANALIZACYJNYCH PRZY ZASTOSOWANIU EMC

Tworzenie systemów coraz bardziej niezawodnych możliwe jest dzięki budowaniu modeli fizycznych lub matematycznych, na których może być symulowana praca różnych wariantów rozwiązań technicznych tego samego systemu.

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny wzrost zainteresowania tym drugim rodzajem modeli. Stało się to dzięki coraz bardziej powszechnym i doskonalszym elektronicznym maszynom cyfrowym (EMC) i znacznie niższym kosztom, w porównaniu z budową modeli fizycznych. Dotyczy to również systemu jaki tworzy sieć kanalizacyjna. Modele pracy tej sieci bazują na układzie dwóch równań Saint-Venanta:

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

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

gdzie:

A — pole przekroju strumienia, m

Q — natężenie przepływu dm^3/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 $F = \frac{V}{\sqrt{A \cdot g \cdot B}}$

B — szerokość zwierciadła wody, m

g — przyspieszenie ziemskie, m/s^2

D_L — człon zależny od rodzaju dopływu q .

Rozwiązanie układu równań (1) i (2), gdzie przepływ Q i wysokość napełnienia $H = f(A)$ są wielkościami niewiadomymi, przy uwzględnieniu równań charakterystycznych (na początku i na końcu kanału), wymaga w zależności od długości odcinka L i kroku podziału Δx rozwiązania układu $2 \cdot L/\Delta x$ równań. W praktyce ilość niewiadomych waha się w granicach 20—50. Proces ten dla rozpatrywanego układu kanałów musi być tyle razy powtarzany, aż uzy-

ska się spełnienie zadaną dokładnością dwóch warunków w węzłach połączeniowych, z których pierwszy dotyczy zgodności sumy dopływów z węzła ($\Sigma Q = 0$), zaś drugi zgodności poziomów zwierciadeł wody.

Przeprowadzenie podobnych obliczeń dla następnej chwili czasowej ($t = t + \Delta t$) wymaga zapamiętania wartości natężeń przepływów Q i wysokości napełnień H we wszystkich punktach podziału sieci. Są to główne czynniki, które powodują, że czas symulacji zjawisk zachodzących w kanałach wielokrotnie przewyższa ich czas trwania w rzeczywistych warunkach. Zjawiska te mogą być symulowane tylko na maszynach o dużych pamięciach operacyjnych (PAO). Tak skonstruowane modele nie będą dostępne dla ogromnej większości projektantów i eksploatorów. Ponadto nie uwzględniają one bardzo istotnych czynników (praca pod ciśnieniem, retencyjny wpływ studzienek kanalizacyjnych), co powoduje istotne błędy przy symulacji całej sieci. Do tego nakładają się jeszcze niedokładności danych wejściowych dotyczących dopływów, np. wybór deszczu miarodajnego dla danego regionu, gdzie położona jest sieć, wyznaczenie właściwych zlewni, współczynników spływu, retencji terenowej itp.

Pomimo stosowania równań dokładnie opisujących ruch fali w kanałach, otrzymane wyniki mogą istotnie odbiegać od rzeczywistych zjawisk. Długi czas obliczeń i trudności w dostępie do dużych EMC wymagają opracowania modeli „szybkich”, dających w miarę adekwatny do rzeczywistych warunków obraz pracy sieci.

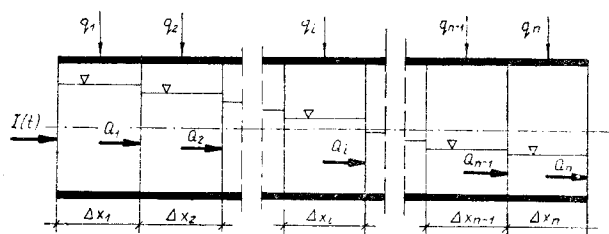
W artykule przedstawiono metodę modelowania pracy sieci kanalizacyjnej opartą na równaniu ciągłości (1) i równaniu uwzględniającym straty hydrauliczne, opisane wzorem Manninga:

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

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 Δx_i (za wyjątkiem pierwszego) dopływa Q_{i-1} a wypływa 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:

$$\begin{aligned}Q_1 &= \frac{1}{N} \cdot R_1^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \cdot A_1 \\ &\vdots \\ Q_i &= \frac{1}{N} \cdot R_i^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \cdot A_i \\ &\vdots \\ Q_n &= \frac{1}{N} \cdot R_n^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \cdot A_n\end{aligned}\quad (5)$$

przy założeniu, że współczynnik chropowatości „N” oraz spadek dna kanału S_0 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 ΔA w czasie Δt :

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

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

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

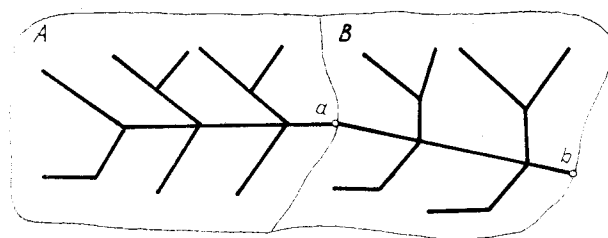
po połączeniu równań (8) i (7) otrzymano:

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

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 każdego punktu podziału odcinka (krok Δx_i) na wszystkich poziomach czasu symulacji (krok Δt), gdzie L — długość odcinka, T — całkowity czas symulacji.

Na tej podstawie określić można korzystając z równania Manninga: wartość przepływów $Q_{x=0,L}$; prędkości $V_{x=0,L}$ i napełnienia kanału $H_{x=0,L}$. 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 (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 w 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 wartości 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

$$q_d = \frac{1644,7}{p^{0,3738} t_d^{0,3845}} \quad [\text{dm}^3/\text{s ha}] \quad (11)$$

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, $\%$, ($p=100/c$).

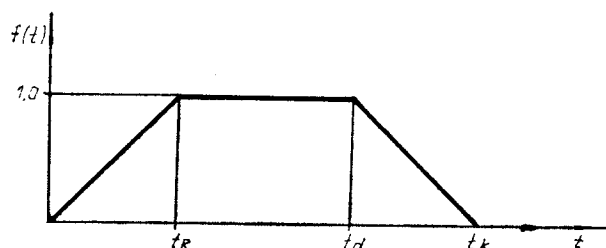
Ilość wody, która nie dopłynie do kanału tzn. wsiąknie w teren, zostanie zatrzymana, wyparuje, można uwzględnić przez zastosowanie współczynnika spływu ψ , przyjmowanego wg zamieszczanych w literaturze tabel lub obliczonego wg wzoru np. Reinholda:

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

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 od razu spływa do kanału, lecz odbywa się to stopniowo z coraz bardziej odległych fragmentów zlewni. Zjawisko to uwzględnia czas retencji terenowej t_r , który może być przyjmowany wg tabel lub na podstawie analizy takich czynników, jak kształt zlewni, położenie kanału, spadek terenu itp. Zjawisko to można również uwzględnić przez zastosowanie współczynnika $f(t)$ zależnego od czasu (Rys. 3).



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 spływu 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:

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

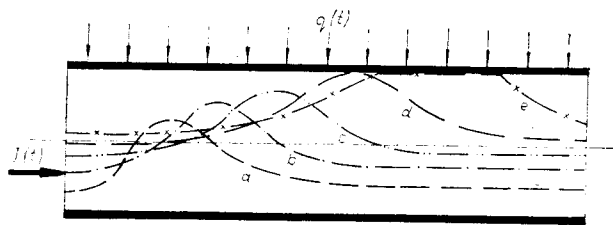
gdzie: L — długość kanału, m.

Zadanie dopływów w postaci funkcji $Q_d(t)$ (trapezowej, Pearson'a III, itp.) powoduje po-

wstanie w kanałach fal. Zmienny czas przepływu przez różne odcinki wynikający z prędkości przesuwania się fali (różne spadki, chropowatości, kształty i wielkości przekrojów kanałów, napełniania) powoduje różne nakładanie się fal przy połączeniach kanałów.

Dzięki symulacji można ujawnić najbardziej niekorzystne przypadki tzn. takie, gdzie spotykają się maksymalne przepływy. Przepięcia mogą występować nie tylko w miejscach połączeń odcinków, ale również w dowolnym przekroju kanału.

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 przepełnienia kanału

Zjawisko to można w bardzo prosty sposób uwzględnić, modyfikując metodę symulacji przedstawioną w głównej części opracowania, tzn. dodając jedynie zmienną (tablice zmiennych), w której zapamiętywane będą wartości dopływu nie mieszczącego się w kanałach (Q_p). Na podstawie tych wartości (określanych dla deszczów miarodajnych) można dobierać najbardziej korzystne rozmieszczenie kanałów retencyjnych, zbiorników, przelewów burzowych oraz wstępnie dobierać ich parametry techniczne.

Uwzględnienie w modelu dodatkowych urządzeń wymaga przeprowadzenia każdorazowo analizy ich konstrukcji. Mogą one być również we wstępnych obliczeniach uwzględnione w uproszczeniu, np:

- zbiorniki mogą być zadawane przez zapamiętywanie wartości objętości wód deszczowych zatrzymywanych, wynikającej z różnicy dopływu i odpływu ze zbiornika,
- przelewy mogą być zadawane jako odpływy skupione z węzłów sieci o wielkości zależnej od obliczonej wysokości napełnienia.

Opracowany model pomimo swoich wad (nieuwzględnienie zjawiska „cofki” fali, brak wpływu kanałów „dolnych” na „górne”, mniejsze

niż w dokładnych metodach symulacji uwzględnienie retencji kanałowej na kształt fali) dobrze odwzorowuje dynamiczny obraz pracy sieci, przez co w połączeniu z zaletami (może pracować stosunkowo szybko na ogólnodostępnym sprzęcie minikomputerowym) staje się niezwykle przydatnym narzędziem pracy dla szerokich rzesz projektantów i eksploataatorów.

W Instytucie Inżynierii Sanitarnej i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej opracowano dwa takie modele: S15 i S25. Prowadzą one symulację pracy sieci kanalizacyjnej złożonej maksymalnie z 50 odcinków dla zadanych wartości:

- dotyczących poszczególnych odcinków sieci (długości, spadki dna, współczynniki chropowatości, kształty i wymiary kanałów, wartości natężenia przepływu ścieków sanitarnych, powierzchnie i współczynniki spływu zlewni oraz czas retencji terenowej),
- dotyczących całej sieci (natężenie deszczu i czas jego trwania),
- dotyczących procesu symulacji (całkowity czas symulacji, wartość kroku czasowego, wielkości sterujące wydrukami wyników, które m. in. zawierają obliczone przepływy, wysokości zapełnienia, prędkości przepływu we wszystkich rozpatrywanych elementarnych segmentach sieci kanalizacyjnej).

Program S15 prowadzi obliczenia do momentu wystąpienia przepełnień kanałów co sygnalizuje informacjami na jakich odcinkach i kiedy dane przepełnienie wystąpiło.

Program S25 jest wersją programu S15 rozbudowaną o dodatkowe zapamiętywanie ilości wód deszczowych „nie mieszczących” się w przewodach.

Oba programy w chwili obecnej (kwiecień 84) są w trakcie testowania, które odbywa się na bazie istniejących sieci krakowskich osiedli (np. Azory — sieć o 35 kanałach). Programy pracują na minikomputerze Mera 400, o pamięci operacyjnej 32 k.

LITERATURA

1. W. BŁASZCZYK, H. STAMATELLO, P. BŁASZCZYK: Kanalizacja — sieci i pompownie; Arkady, Warszawa 1983 r.
2. T. STRELKOFF: One Dimensional Equations of Open-Channel Flow; J. Hydraul. Div. ASCE, Vol. 95 No HY3 May 1969 pp 861-876.
3. T. STRELKOFF: Numerical Solution of Saint-Venant Equations; J. Hydraul. Div. ESCE, Vol. 96 No HY1 Jan. 1970 pp 223—252.
4. E. WOŁOSZYN: Matematyczny model przepływów w sieci kanalizacyjnej; Archiwum Hydrotechniki, Gdańsk, 1979 zeszyt 4, str. 559—585.