

dr inż. Jan Mičín

Wydział Budownictwa
Politechniki w Brnie

WYBRANE MODELE SYMULACJI PRZEPŁYWU ŚCIEKÓW W SIECIACH KANALIZACYJNYCH

W dziedzinie kanalizacji istnieje wiele modeli i metod, służących do określania natężenia przepływu w poszczególnych odcinkach sieci kanalizacyjnej. Obok metod uproszczonych (prosta metoda sumowa, tzw. metoda racjonalna i jej modyfikacje), znane są bardziej złożone i pracochłonne metody uwzględniające większą liczbę czynników (metoda hydrogramu jednostkowego, metoda Tholinowa ze zmiennym deszczem miarodajnym itp.). Często jednak pomiędzy wynikami obliczeń wg określonego modelu matematycznego a warunkami rzeczywistymi, panującymi w sieci kanalizacyjnej istnieją bardzo dyskusyjne relacje. Szerokie stosowanie wielu z tych metod jest ograniczone z uwagi na to, że często były one sformułowane dla ściśle określonych warunków (charakter zabudowy, powierzchnia terenu itp.). Stąd też nie mogą być obecnie powszechnie stosowane. Do starszych metod, nie znajdujących obecnie szerokiego zastosowania, zaliczyć należy grupę metod, służących do określania natężenia przepływu ścieków przy pomocy wzorów empirycznych (wg Adamsa, Gregorego, Bürkli-Zieglera i innych). Obecnie na skutek wprowadzenia elektronicznej techniki obliczeniowej do szerokiej praktyki, zaniechano stosowania popularnych dawniej metod graficznych i obliczeniowo-graficznych. Do metod tych zaliczyć można m. in. metodę Másla (stosowaną do wymiarowania sieci kanalizacyjnej w Pradze), metodę Vicari-Hauffa i wiele innych.

Stosowanie w obecnej praktyce inżynierskiej powyższych metod jest uzasadnione jedynie w przypadku projektowania rozbudowy sieci kanalizacyjnych, obliczonych wcześniej tymi metodami.

Elektroniczna technika obliczeniowa, tak jak w szeregu innych dziedzin, tak i w dziedzinie obliczania sieci kanalizacyjnej, znalazła obecnie szerokie zastosowanie i podstawowe znaczenie, ze względu na zwiększenie dokładności i szybkości obliczeń. Obok wykorzystania do obliczeń znanych metod, co było pierwszą fazą zastosowania ETO w dziedzinie kanalizacji, stworzyła ona warunki do opracowania szeregu nowych metod, od stworzenia algorytmów znanych lecz dawniej nierozwiązywalnych metod, do wariantowania obliczeń, a w swym najwyż-

szym stadium do optymalizacji i automatycznego sterowania dużymi systemami kanalizacyjnymi.

Analiza nieustalonego przepływu ścieków w sieci kanalizacyjnej

Szybki rozwój ETO umożliwił szczegółową analizę nieustalonego przepływu ścieków w sieciach kanalizacyjnych, a także w kanałach otwartych. Problematyką tą zajmowało się wielu autorów, którzy opracowali odpowiednie metody oraz programy do tych metod. W Czechosłowacji omawianą problematyką zajmowali się Čížek [3] i Sobota [8], natomiast z autorów zagranicznych między innymi: Booi [1], Wołoszyn [11], a ostatnio Stepiene [9]. Istotą metody nieustalonego przepływu jest sposób rozwiązania układu równań różniczkowych Barré de Saint-Venanta dla kanałów o przekroju kołowym:

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

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{v^2}{C^2 R} \quad (2)$$

gdzie:

- Q — natężenie przepływu, m³/s
- S — powierzchnia przekroju poprzecznego, m²
- x — odległość przekroju od przyjętego początku, m
- t — czas, s
- h — wzniesienie poziomu wody ponad przyjęty poziom porównawczy, m
- v — średnia prędkość przepływu, m/s
- C — współczynnik prędkości w równaniu Chézy
- R — promień hydrauliczny, m
- g — przyspieszenie ziemskie, m/s².

Przy danych ograniczeniach początkowych i brzegowych układ równań rozwiązuje się odpowiednią metodą numeryczną, najczęściej jedną z metod różnicowych. W przypadku stosowania metod standardowych występują trudności ze stabilnością obliczeń oraz przyjęciem przedziałów Δx i Δt w węzłach sieci. Podstawowym problemem (dotychczas jeszcze całkowicie nie rozwiązany) jest przyjęcie warunków brzegowych, które formułuje się dla wę-

złów skrajnych przyłączy wpustów deszczowych, a które przy obecnej znajomości zależności hydraulicznych w tych przyłączach możemy wyrażać tylko w formie uproszczonej. Szczegółowa ocena poszczególnych metod obliczeń, a zwłaszcza programów jest utrudniona, gdyż większość z nich (zwłaszcza programów prywatnych firm zachodnich) jest przysłowio-
wą „czarną skrzynką” z bardzo ubogim opisem. Jako przykład może posłużyć program CARE-DAS firmy Sogreach (Grenoble, Francja), który służy do obliczania całego procesu odpływu ścieków, począwszy od transformacji odpływu opadu ze zlewni, aż do właściwej hydrauliki w sieci kanalizacyjnej. W części hydrologicznej programu wykorzystano metodę CAQUOT-MUSKINGUM, a właściwy schemat obliczeń ma postać uwikłaną. Program ten był wielokrotnie wykorzystywany do obliczeń odpływu z rozległych terenów we Francji, a także w innych krajach. W tym konkretnym przypadku — oczywiście z powodów komercyjnych — brak jest szczegółowych opisów warunków brzegowych w prospektach firmowych.

Przy symulacji warunków brzegowych autorzy wychodzą zazwyczaj z warunku, że suma odpływu i dopływu do węzła jest równa zeru, uzupełnionego warunkiem wyrównania zwierciadeł ścieków w studzienkach sieci kanalizacyjnej. Należy sądzić, że na obecnym poziomie znajomości zależności hydraulicznych w obiektach sieci kanalizacyjnej, każda dokładniejsza symulacja jest dyskusyjna, zwłaszcza w przypadku uskoków w studzienkach, uskoku wodnego itp.

Obecny poziom wiedzy teoretycznej oraz doświadczeń praktycznych na temat obliczeń sieci kanalizacyjnych świadczy o tym, że osiągnięcie wymiernego postępu w metodach obliczania dużych sieci kanalizacyjnych, z wykorzystaniem równań Barré de Saint-Venanta i z uwzględnieniem w maksymalnym stopniu specyfiki sieci kanalizacyjnych, wymaga jeszcze wielu pracochłonnych badań. Dlatego zdecydowano się obecnie na uproszczenia, które umożliwiłyby opracowanie modeli złożonych, lecz nadających się do obliczania sieci kanalizacyjnych przy założeniu nieustalonego ruchu ścieków w kanałach. Jednym z takich modeli jest „metoda przybliżonej symulacji przepływu nieustalonego w sieci kanalizacyjnej” opracowana w Katedrze Inżynierii Sanitarnej Wydziału Budownictwa Politechniki w Brnie.

Modelowanie przepływu metodą przybliżonej symulacji

Metoda ta została szczegółowo opisana w czasopiśmie *Vodohospodársky Časopis* (6/1983), a także była prezentowana w Politechnice Wrocławskiej w ramach współpracy pomiędzy uczelniami. Istotą metody (z uwzględnieniem uproszczeń podanych w pracy [10]) jest zastąpienie ciągłego dopływu do węzła początkowego każdego odcinka sieci przepływem dyskretnym (nieciągłym) o stałej wartości w okresie

przyjętego przedziału czasowego ϑ . Przyjęto, że przepływ w kanale jest ustalony i równomierny w przyjętym przedziale czasu i zmienia się skokowo na granicy przedziałów. Przyjęta zmiana natężenia przepływu ścieków od wartości Q_1 do wartości Q_2 spowoduje powstanie fali, która rozchodzi się w kanale z prędkością:

$$c = \frac{Q_2 - Q_1}{S_2 - S_1} \quad (3)$$

gdzie:

S_1 i S_2 są czynnymi przekrojami kanału przy natężeniach przepływu Q_1 i Q_2 (przy założeniu, że przepływ jest ustalony i równomierny).

W okresie ϑ przepływ ustabilizuje się, a natężenie przepływu traktujemy znowu jako ustalone i równomierne. Fala pokona w okresie czasu ϑ drogę $x = c\vartheta$, którą nazwano „odcinkiem fikcyjnym”. Ponieważ w kanale o określonych wymiarach i spadku zachodzi funkcyjna zależność pomiędzy natężeniem przepływu i powierzchnią przekroju czynnego, można zastosować twierdzenie Lagrange'a, wg którego w każdym przedziale natężenia przepływu $\langle Q_1, Q_2 \rangle$ istnieje przynajmniej jedno natężenie Q^* (czynny przekrój S^*), które spełnia zależność:

$$\frac{Q_2 - Q_1}{S_2 - S_1} = f'(S^*) \quad (4)$$

Jeśli przyjmiemy dla każdego przekroju kanału przedział natężenia przepływu $\langle Q_o, Q_m \rangle$, gdzie Q_m jest mniejsze od maksymalnego natężenia przepływu w tym przekroju (przepustowość kanału), to każda prędkość fali jest ele-

mentem zbioru pochodnych $\frac{dQ}{dS}$ dla Q leżącego w przedziale $\langle Q_o, Q_m \rangle$. Zbiór tych pochodnych umożliwia ocenę, jakie prędkości osiągają fale w przedziale $\langle Q_o, Q_m \rangle$. Do metody przybliżonej symulacji Šerek i współpracownicy opracowali dwa podstawowe programy w kilku wersjach i z różnymi modyfikacjami [10].

W pierwszej fazie prac powstał program JRET. W programie tym uwzględniono wynik szczegółowej analizy parametrów przepływu w kanale. Na podstawie tej analizy ustalono, że prędkość fali w przekroju kołowym jest tylko funkcją średnicy, spadku i chropowatości kanału i że może ona być w przyjętym przedziale napełnienia uważana za niezależną od głębokości napełnienia. Po dokonaniu odpowiednich przekształceń, wychodząc ze wzoru Chézy i uwzględniając wzór Manninga, otrzymano zależność do obliczania długości drogi fali, a tym samym długości „odcinka fikcyjnego”, w następującej postaci:

$$x = 0,4819 \frac{1}{n} d^{2/3} J^{1/2} \vartheta \quad (5)$$

gdzie:

- n — współczynnik chropowatości do wzoru Manninga
- d — średnica kanału, m
- J — spadek dna kanału
- ϑ — przyjęty przedział czasowy, s

Obliczanie sieci kanalizacyjnej jest bardzo ułatwione, ponieważ przyjęcie stałej prędkości fali w danym przedziale napełnienia w istocie rzeczy ogranicza obliczenia hydrauliczne do określenia długości „odcinków fikcyjnych”. Program umożliwia przyjmowanie dowolnego rozkładu natężenia deszczu w czasie i przestrzeni, dowolnego współczynnika spływu, uwzględnienie retencji terenowej oraz czasu przepływu wody w zlewni (w odpowiednim segmencie programu czas przepływu jest zdefiniowany za pomocą znanych „wzorów genetycznych”). W węzłach, które symulują zbiorniki retencyjne, obliczane są retencyjne pojemności zbiorników na podstawie zadanych krzywych dopływu ścieków. Program umożliwia po niewielkiej adaptacji (należy sądzić, że w przypadku bezpośredniego dostępu do EMC, bardziej optymalne będzie konstruowanie programu podstawowego i wprowadzanie dla poszczególnych specyficznych przypadków drobnych adaptacji niż opracowywanie obszernych programów uniwersalnych) wybór odpowiedniej kombinacji postępowania do rozwiązania poszczególnych faz obliczeń. Program można również stosować do obliczania sieci kanałów płuczających przy znanym dopływie wód płuczających do sieci. Program umożliwia także wprowadzanie dopływów punktowych. Należy stwierdzić, że błąd względny $\pm 13,12\%$, który w przedziale napełnienia względnego $h/d=0,25-0,75$, jest popełniany na skutek przyjęcia stałej prędkości fali, jest do przyjęcia ze względu na dokładność danych przyjmowanych do obliczeń sieci kanalizacyjnej. Napełnieniu względnemu $0,25$ odpowiada $13,7\%$ zdolności przepustowej kanału, która to wielkość nie jest miarodajna ze względu na rzeczywisty stan sieci (zamulenie, wody przypadkowe itp.). Przy napełnieniu względnym powyżej $0,75$ przechodzi się do mało zbadanego obszaru hydraulicznego, w którym wg szeregu autorów spełnienie warunku przepływu ustalonego jest problematyczne.

W drugiej fazie prac postanowiono uwzględnić zmienną prędkość fali, zależną również od napełnienia w kanale. Do tej metody opracowano program JPSNP w języku Fortran 4 na maszynę cyfrową ADT 4500. Zasadę „odcinków fikcyjnych” zastąpiono „macierzą czasową”, w której są zapamiętywane dane o przepływie w poszczególnych odcinkach sieci kanalizacyjnej. W ten sposób wyeliminowany został błąd spowodowany przyjęciem stałej prędkości fali w odcinku kanału. Właściwe obliczanie sieci za pomocą programu JPSNP przebiega następująco: macierz czasowa ma „ m ” wierszy i „ n ” kolumn, gdzie „ m ” jest liczbą odcinków sieci, a „ n ” jest maksymalną liczbą przedziałów czasowych, w czasie których fala może przebiec drogę od początku do końca odcinka sieci. Na

końcu każdego przedziału czasowego kanałem płyną ścieki o natężeniu Q_1 zajmując czynny przekrój kanału S_1 . Natężenie przepływu zmienia się skokowo do wartości Q_2 a czynny przekrój do wartości S_2 , co powoduje powstanie fali. Ze wzoru (3) można obliczyć prędkość fali w rozpatrywanym odcinku sieci. Po przyjęciu równomiernego przepływu ustalonego określa się czas i liczbę przedziałów czasowych N potrzebnych do tego, aby fala przebyła cały rozpatrywany odcinek kanału. Wartość natężenia przepływu Q_2 wprowadza się do N -tej kolumny i M -tego wiersza macierzy czasowej, gdzie N jest obliczoną liczbą przedziałów czasowych a M jest numerem węzła końcowego danego odcinka kanału. Na końcu przedziału czasowego wartości w macierzy czasowej przesuwane są o jeden przedział czasowy (jedna kolumna) w lewo, a wartości z pierwszej kolumny macierzy (plus dopływ ze zlewni elementarnej) stanowią nową wartość Q_2 do obliczenia prędkości fali w niższym odcinku sieci.

Możliwości programu JPSNP są takie same jak programu JRET z tym, że prędkość fali nie jest stała, a program może być stosowany do obliczeń sieci o dowolnych przekrojach kanałów, przy czym w poszczególnych odcinkach sieci mogą być również różne przekroje poprzeczne kanału.

Wnioski

1. W przypadku stosowania modelu przybliżonej symulacji nieustalonego przepływu w sieci kanalizacyjnej, posługujemy się w pewnym sensie rozwiązaniem modelowym, różniącym się od rzeczywistości. Niektóre przyjęte założenia upraszczają proces obliczeń, niemniej jednak w porównaniu z metodami stosowanymi obecnie w praktyce (opartymi np. na ruchu ustalonym), proponowana metoda jest znacznym krokiem w kierunku zbliżenia matematycznych modeli działania sieci kanalizacyjnych do warunków rzeczywistych. Wprowadzenie nowych rozwiązań nie powoduje zmniejszenia przydatności rozwiązań starszych i sprawdzonych, przy pomocy których nie oblicza się sieci jako całości, lecz służą do określania maksymalnych przepływów w poszczególnych odcinkach sieci. Do metod tych zaliczyć można tzw. metodę racjonalną i jej modyfikacje (w CSRS metoda Bartoska zalecana w ZSRR przez normę SNIP oraz metoda Caquot zalecana we Francji).

2. Metody nowoczesne będą miały szersze zastosowanie dopiero wtedy, gdy będą do dyspozycji odpowiednie dane hydrauliczne i hydrologiczne (charakterystyka deszczów miarodajnych o zmiennej intensywności, szczegółowe określenie charakteru spływu po zlewni itd.). Jednakże już teraz można stwierdzić, że założenia upraszczające przy obliczaniu skomplikowanych odpływów są jedną z dróg, która istotnie rozszerza możliwości uwzględnienia dalszych parametrów, oddziałujących na charakter odpływu w sieciach kanalizacyjnych, a których dawniej nie można było brać pod uwagę.

LITERATURA

1. N. BOOIJ: Flow in networks. In: Numerical method in fluid dynamics. Proceedings of the International Conference held at the University of Southampton, England, 1973. Pentech Press London 1974, s. 290—306.
2. J. A. CUNGE: Au sujet d'une methode de calcul de propagation de crues (methode MUSKINGUM). In: Journal de Recherches Hydrauliques 7/1969, s. 205—230.
3. P. ČÍŽEK: Rozbor odtokových poměrů deštových vod z městského povodí. Doktorská disertační práce, ČVUT Praha, 1965.
4. J. GAILLARD, A. FREROT: Conception des re-seaux d'assainissement. CERGRENE Paris, octobre 1983, s. 131.
5. P. GABRIEL, J. KRATOCHVÍL, M. ŠEREK: Výpočetní technika pro obor vodní hospodářství a vodní stavby. Praha, SNTL-ALFA 1982, s. 502.
6. Y. KOVACS: Modeles desimulation d'ecoulement unidimensionnel a surface libre. CERGRENE Paris, janvier 1984, s. 42.
7. A. M. KURGANOV: Zakonomernosti dviženija vody v dožděvoj i obščesplavnoj kanalizaciji. Moskva, Strojizdat 1982, s. 71.
8. J. SOBOTA: Aplikace samočinných počítačů pro výpočet stokových sítí. Kandidátská disertační práce, ČVUT Praha 1974.
9. I. STEPIEN: On de numerical solution of the Saint-Venant Equations. Journal of hydrologie. 67, 1984, s. 1—11.
10. M. ŠEREK, J. MIČÍN: Přibližná simulace neustáleného proudění v deštových stokových sítích. Vodohospodářský časopis 6/1983, s. 595—606.
11. E. WOŁOSZYN: Matematyczny model przepływów w sieci kanalizacyjnej. Archiwum Hydrotechniki, 1979, nr 4, s. 559—583.
12. SOGREAH — program CAREDAS