

Milan Šerek

ZASTOSOWANIE MIKROKOMPUTERÓW DO OBLICZANIA SIECI KANALIZACJI DESZCZOWEJ

Obecnie do wielu biur projektowych wprowadzono mikrokomputery o ograniczonej pamięci wewnętrznej i małej szybkości operacyjnej, przy pomocy których nie można rozwiązywać zadań, wymagających dużej pamięci wewnętrznej i bardzo wielu operacji. Mimo to można przy ich pomocy obliczać również i zadania o dość dużym stopniu zajętości pamięci, przy czym algorytm zadania musi być dostosowany do możliwości mikrokomputera. Poniżej omówiono metodę obliczania sieci kanalizacji deszczowej, która ma prosty i przejrzysty algorytm i nie posiada niektórych wad metod tradycyjnych. Przy zastępowaniu dokładnych wyrażeń matematycznych wyrażeniami przybliżonymi dąży się do tego, aby błędy obliczeń były mniejsze od technicznie dopuszczalnych. Zasadniczym wymaganiem algorytmu na mikrokomputer jest konieczność obniżenia liczby informacji, wprowadzanych do jego pamięci wewnętrznej, co uzyskuje się dzięki możliwości konwersacji z komputerem. W ten sposób wyraźnie obniża się liczbę zapamiętywanych danych przez mikrokomputer, co umożliwia zwiększenie wielkości obliczanych sieci. Przy pomocy mikrokomputera o pamięci wewnętrznej 64 kB można omawianym sposobem obliczać sieci składające się z 1000 i więcej odcinków.

Uprozczone obliczanie hydrauliczne kanału

Omawiany program ma zastosowanie tylko do obliczania kanałów o przekroju kołowym, przy czym zakłada się przepływ równomierny ustalony, a do obliczeń hydraulicznych stosuje się wzór Chezy z empirycznym współczynnikiem Manninga. Dla natężenia przepływu Q , spadku dna kanału J oraz współczynnika chropowatości n oblicza się teoretyczną średnicę całkowicie wypełnionego kanału d_t według zależności:

$$d_t = 1,548 n^{0,375} Q^{0,375} J^{-0,1875}, \text{ m} \quad (1)$$

a następnie dobiera się najbliższą wyższą znormalizowaną średnicę kanału.

W celu obliczenia wysokości napełnienia kanału i prędkości przepływu ścieków (przy częściowym wypełnieniu) opracowano zależność uproszczoną. Z zależności tej można obliczyć wysokość napełnienia h [m] i prędkość przepływu v [ms^{-1}] z wystarczającą dokładnością dla napełnień:

$$0,2 \leq \frac{h}{d} \leq 0,8 \quad (2)$$

Przy napełnieniu do 20% wysokości kanału (tj. w przybliżeniu do 90% natężenia przepływu przy całkowitym napełnieniu kanału) dokładne obliczanie parametrów hydraulicznych nie ma praktycznego znaczenia, gdyż na dnie kanału znajdują się osady i płyną kanałem wody pochodzące z infiltracji. Wskutek tego wyniki obliczeń i wyniki dokładnych pomiarów przepływu w kanale różnią się od siebie znacznie. Obszar przepływu powyżej 80% wysokości napełnienia kanału jest bardzo niestabilny. Wielu autorów podaje dla tego obszaru szereg krzywych konsumpcyjnych, różniących się znacznie od krzywej obliczonej na podstawie wzoru Chezy. Z tego względu opisana metoda wyklucza większe napełnienie niż 82% wysokości przekroju. W przedziale napełnień określonych nierównością (2) można z wystarczającą dokładnością aproksymować krzywą konsumpcyjną i krzywą prędkości przepływu za pomocą zależności:

$$\frac{Q}{Q_c} = 1,6031 \left(\frac{h}{d} - 0,0893 \right)^{4/3} \quad (3)$$

$$\frac{v}{v_c} = 1,317 \left(\frac{h}{d} - 0,0893 \right)^{1/3} \quad (4)$$

gdzie:

d — średnica wewnętrzna kanału, m

h — wysokość napełnienia, m

Q — natężenie przepływu w kanale, m^3s^{-1}

v — prędkość przepływu przy częściowym napełnieniu, ms^{-1}

v_c — prędkość przepływu przy całkowitym napełnieniu, ms^{-1} .

Błąd względny aproksymacji krzywych w pobliżu granic przedziału nierówności (2) nie przekracza 2,5%. Maksymalny błąd względny, jaki może wystąpić w całym przedziale nierówności (2) wynosi 5,3%.

Na rys. 1 linią ciągłą oznaczono krzywą natężenia przepływu, określoną na podstawie zależności (3) i krzywą prędkości przepływu określoną z zależności (4). Linią przerywaną zaznaczono te części krzywych, określonych na podstawie wzoru Chezy, których przebieg różni się zasadniczo od krzywych według zależności (3) i (4). Jeśli z równań (3) i (4) wyeliminujemy względne napełnienie h/d , to otrzymamy zależność:

$$\frac{v}{v_c} = 1,1704 \left(\frac{Q}{Q_c} \right)^{0,25}$$

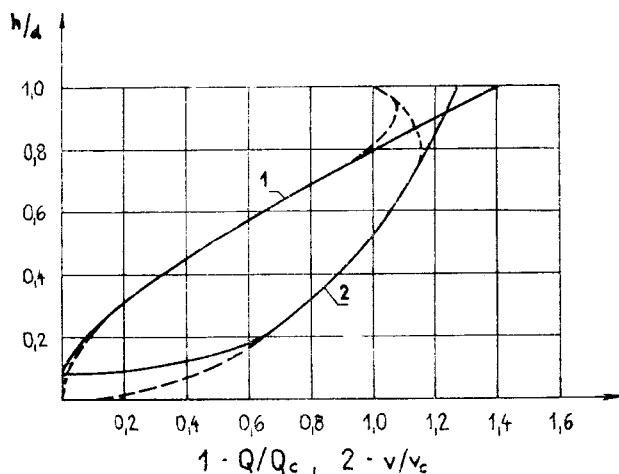
a po podstawieniu do powyższego wzoru za Q_c i v_c zależności otrzymanych ze wzoru Chezy, otrzymamy równanie:

$$v = 0,6216 n^{-0,75} Q^{0,25} J^{0,375}, \text{ ms}^{-1} \quad (5)$$

gdzie:

Q — natężenie przepływu, m^3/s

J — spadek dna kanału, m/m .



Rys. 1 Krzywe sprawności przekroju kanału

Ze wzoru (5) wynika, że prędkość przepływu ścieków w kanale częściowo napełnionym nie zależy od średnicy kanału i wysokości jego napełnienia. Powyższy wniosek należy uzupełnić obliczeniami wyrównawczymi prędkości według równania (5) i wykorzystać w metodach powszechnie stosowanych przy obliczaniu sieci kanalizacyjnych. Ze względu na brak dokładnej znajomości parametrów hydraulicznych przepływu w kanale, przy innym wypełnieniu niż w przedziale określonym nierównością (2), można umownie używać równania (5) dla napełnień $h/d \leq 0,82$. Napełnień względnych większych od 0,82 nie przewiduje się.

Z równań (4) i (5) można wyprowadzić zależność do obliczania wysokości napełnienia kanału:

$$h = 1,046 \frac{Q}{v \cdot d} + 0,0893 d, \quad m \quad (6)$$

gdzie: d — wewnętrzna średnica kanału, m . Wartości parametrów hydraulicznych kanału, obliczonych metodą uproszczoną, różnią się nieznacznie od wyników dokładnych obliczeń na podstawie wzoru Manninga. W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń napełnienia kanału (h^*) ze wzoru (6) i prędkości przepływu (v^*) ze wzoru (5) oraz odpowiadające im wartości h i v obliczone ze wzoru Manninga, dla kanałów o średnicach od 0,5 m do 1,0 m , spadku $J=0,012$, którymi płyną ścieki o natężeniu $Q=0,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tabela 1

WYNIKI OBLICZEŃ NAPEŁNIENIA KANAŁU I PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU

d m	h m	v ms^{-1}	h^* m	v^* ms^{-1}
0,5	0,329	2,186	0,336	
0,6	0,290	2,194	0,297	
0,7	0,269	2,190	0,271	
0,8	0,254	2,167	0,254	2,152
0,9	0,241	2,124	0,242	
1,0	0,232	2,124	0,235	

Korzystanie z równania (5) służącego do uproszczonego obliczania hydraulicznego kanału, eliminuje niektóre wady metody deszczu krytycznego. Jeśli prędkość przepływu ścieków w ka-

nale nie zależy od średnicy i napełnienia kanału, jak to wynika ze wzoru (5), to i czas przepływu ścieków w odcinku kanału również nie zależy od średnicy i napełnienia kanału:

$$t = 0,02681 n^{0,75} Q^{-0,25} J^{-0,375} L, \quad \text{min} \quad (7)$$

gdzie: L — długość odcinka kanału, m .

Każdemu obliczeniowemu odcinkowi kanału przyporządkowana jest suma wszystkich zredukowanych powierzchni cząstkowych, położonych powyżej rozpatrywanego odcinka oraz zredukowana powierzchnia cząstkowa przyporządkowana do tego odcinka. Przez powierzchnię zredukowaną rozumie się powierzchnię zlewni pomnożoną przez współczynnik spływu. Natężenie przepływu kanałem można obliczyć z zależności:

$$Q = 0,001 i_0 \Sigma s_r, \quad m^3 s^{-1}$$

gdzie: i_0 — natężenie deszczu, $dm^3 s^{-1} ha^{-1}$.

Po podstawieniu powyższej zależności do równania (7) otrzymamy zależność czasu przepływu przez odcinek kanału od natężenia deszczu:

$$t_0 = 0,1508 n^{0,75} i_0^{-0,25} (\Sigma s_r)^{-0,25} J^{-0,375} L, \quad \text{min} \quad (8)$$

Z równania (8) wynika, że przy zmianie natężenia deszczu z i_0 na i zmieni się czas przepływu kanałem z t_0 na t według zależności:

$$t = t_0 \left(\frac{i}{i_0} \right)^{-0,25} \quad (9)$$

Można łatwo wykazać, że jeśli zależność (9) jest słuszna w odniesieniu do zmiany czasu przepływu w jednym odcinku kanału, to również jest słuszna w odniesieniu do zmiany czasu przepływu w kolejnych, występujących po sobie odcinkach kanału o różnych fizykalnych własnościach tych odcinków.

Obliczanie sieci kanalizacji deszczowej metodą deszczu krytycznego

Zasada metody deszczu krytycznego jest znana od 135 lat, a metoda ta jest często stosowana do wymiarowania kanalizacji deszczowej. W metodzie tej zakłada się, że maksymalne natężenie przepływu w określonym miejscu sieci kanalizacji powoduje deszcz, którego czas trwania jest równy czasowi przepływu wody z najbardziej oddalonego miejsca zlewni do rozpatrywanego przekroju (tzw. deszcz krytyczny). Dłuższy deszcz krytyczny nie powoduje zwiększenia odpływu wody, dlatego że powierzchnia zlewni nie może się zwiększyć, a natężenie deszczu jest niższe dla dłuższego czasu jego trwania. Deszcze krótsze o wyższych natężeniach, mogą w określonych warunkach wywołać większy odpływ, mimo uwzględnienia tylko części powierzchni zlewni, jednakże takie sytuacje nie są liczne i dlatego poświęca się im uwagę tylko w szczególnych przypadkach.

Zwykle czasy przepływu przez poszczególne odcinki kanału sumuje się, otrzymując w ten sposób całkowity czas przepływu kanałem od najdalszego miejsca zlewni do przekroju na początku obliczanego odcinka kanału. Do powyższego czasu przepływu dodaje się założony czas przepływu w obliczanym odcinku kanału i odczytuje się obliczeniowe natężenie deszczu z

krzywej natężenia deszczu. Po obliczeniu natężenia przepływu w kanale, doborze średnicy i określeniu prędkości przepływu, dokonuje się korekty założonego czasu przepływu w obliczanym odcinku kanału. Jeśli w węźle schodzi się kilka kanałów, to do obliczania czasu przepływu, miarodajnego do wymiarowania odcinka położonego poniżej węzła, uwzględnia się czas przepływu w tym kanale, w którym jest on najdłuższy. To powszechnie stosowane postępowanie nie jest doskonałe, gdyż każdy przekrój kanału jest wymiarowany na inny deszcz miarodajny, wskutek czego sumaryczny czas przepływu kanałem jest sumą czasów przepływu, obliczonych dla różnych deszczu krytycznych a nigdy dla deszczu, na podstawie którego wymiarujemy obliczany odcinek kanału. Jest to niezgodne z podstawową zasadą metody deszczu krytycznego, mówiącą, że do wymiarowania kanału miarodajny jest deszcz o czasie trwania równym czasowi przepływu ścieków od początku kanału do rozpatrywanego przekroju. Korygowanie tradycyjnym sposobem prędkości przepływu i czasu trwania we wszystkich wyżej położonych odcinkach, przy każdej zmianie natężenia deszczu krytycznego, byłoby bardzo pracochłonne i dlatego błąd ten pomija się, wskutek czego sieć będzie rzadziej przepełniana. Drugą wadą tej metody jest konieczność zakładania czasu przepływu w obliczanym odcinku kanału i jego zmiana po dobraniu wymiaru kanału.

Jeśli przyjęta dopuszczalna odchyłka między założonym a obliczonym czasem przepływu będzie niewielka, wówczas obliczenia hydrauliczne danego odcinka kanału musimy kilkakrotnie powtórzyć. Obliczenia hydrauliczne kanału z wykorzystaniem równań (8) i (9) pozabawione są powyższych wad.

Dalej poddano analizie zależność natężenia deszczu i [$\text{dm}^3\text{s}^{-1}\text{ha}^{-1}$] od czasu jego trwania t [min] według wzoru Lindleya $i=A/t^m$. Przy obliczaniu sieci kanalizacyjnej postępuje się zgodnie z kierunkiem przepływu wody od najwyższych (wierzchołkowych) odcinków do poszczególnych przekrojów sieci, podobnie jak w metodzie tradycyjnej. Przy obliczaniu natężenia przepływu w k -tym odcinku sieci przyjmujemy sumaryczny czas przepływu do końcowego węzła odcinka $k-1$, który oznaczamy przez t_{k-1} . Natężenie deszczu odpowiadające czasowi t_{k-1} oznaczamy przez i_{k-1} . Jeżeli sumaryczny czas przepływu $t_k \leq 15$ min, to przyjmuje się zgodnie z normą czechosłowacką

$$i_k = i_{15} \quad (10)$$

gdzie: i_{15} — natężenie deszczu o czasie trwania 15 minut.

Według równania (8):

$$t_k = t_{k-1} + 0,1508 n_k^{0,75} (\sum S_r)_k^{-0,25} i_{15}^{-0,25} \cdot J_k^{-0,375} L_k \quad (11)$$

przy czym indeks k odnosi się k -tego odcinka sieci. Jeśli czas przepływu t_k obliczony z równania (11) przekroczy 15 min, wówczas odcinek kanału wymiaruje się na natężenie deszczu i_k odpowiadające czasowi trwania t_k . Wszystkie następne odcinki oblicza się już według meto-

dy deszczu krytycznego. Według założeń tej metody dane i_{k-1} oraz t_{k-1} muszą spełniać zależność:

$$i_{k-1} = A t_{k-1}^{-m} \quad (12)$$

W k -tym odcinku kanału natężenie przepływu będzie obliczane na nieznanie dotąd natężenie deszczu i_k . Przy zmianie natężenia deszczu z i_{k-1} na i_k czas przepływu t_{k-1} zmieni się według równania (9) na t'_{k-1} według równania:

$$t'_{k-1} = t_{k-1} \left(\frac{i_k}{i_{k-1}} \right)^{-0,25}$$

a po uwzględnieniu zależności (12) na:

$$t'_{k-1} = A^{0,25} t_{k-1}^{1-0,25m} i_k^{-0,25} \quad (13)$$

Aby otrzymać całkowity czas przepływu do przekroju na końcu k -tego odcinka należy dodać czas przepływu na tym odcinku, obliczony z równania (8), stąd:

$$t_k = A^{0,25} t_{k-1}^{1-0,25m} i_k^{-0,25} + 0,1508 n_k^{0,75} \cdot (\sum S_r)_k^{-0,25} i_k^{-0,25} J_k^{-0,375} L_k$$

Czas przepływu t_k musi być równy czasowi trwania deszczu krytycznego o natężeniu i_k , a mianowicie:

$$i_k = A [A^{0,25} t_{k-1}^{1-0,25m} i_k^{-0,25} + 0,1508 n_k^{0,25} \cdot (\sum S_r)_k^{-0,25} i_k^{-0,25} J_k^{-0,375} L_k]^{-m}$$

Z powyższego równania można obliczyć natężenie deszczu krytycznego dla k -tego odcinka kanału:

$$i_k = \left[A \frac{0,25m-1}{m} t_{k-1}^{1-0,25m} + 0,1508 A^{-1/m} n_k^{0,75} \cdot (\sum S_r)_k^{-0,25} J_k^{-0,375} L_k \right] \frac{m}{0,25m-1} \quad (14)$$

oraz czas przepływu do k -tego przekroju na końcu k -tego odcinka:

$$t_k = \left(\frac{i_k}{A} \right)^{-1/m} \quad (15)$$

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń natężeń i czasów trwania deszczu krytycznych dla trzech kolejnych sąsiednich odcinków kanału. Parametry krzywej natężenia deszczu są następujące: $A=942$, $m=0,66$. Współczynnik szorstkości kanału przyjęto jednakowy i równy $n=0,014$. Powierzchnię zlewni cząstkowej oznaczono przez S_k , a współczynnik spływu przez ψ_k . Z obliczeń tych wynika, że do wyznaczenia natężeń i czasów trwania deszczu krytycznych nie trzeba obliczać natężenia przepływu w kanale i nie trzeba wymiarować kanału.

Tabela 2

WYNIKI OBLICZEŃ NATĘŻEŃ I CZASÓW TRWANIA DESZCZU KRYTYCZNYCH

Numer odcinka	S_k	ψ_k	$(\sum S_r)_k$	J_k	L_k	i_k	t_k
—	ha	—	ha	m/m	m	$\text{dm}^3/\text{s ha}$	min
17	—	—	—	—	—	102,88	28,65
18	1,12	0,38	3,826	0,0042	86	100,33	29,76
19	0,68	0,32	4,044	0,0036	135	98,44	31,60
20	0,55	0,45	4,291	0,0011	115	91,84	34,03

Metoda deszczu krytycznego nie sprawdza się w przypadku, gdy przyrost zredukowanych powierzchni cząstkowych jest niewielki, w porównaniu z przyrostem czasu przepływu. Przyrost sumarycznej powierzchni zredukowanej zlewni może być w porównaniu do przyrostu czasu przepływu tak mały, że dla k-tego odcinka kanału obliczeniowe natężenie przepływu jest mniejsze niż dla odcinka $k-1$. Oczywiście jest, że w tym przypadku maksymalnego odpływu nie spowoduje deszcz krytyczny, ale deszcz o krótszym czasie trwania i wyższym natężeniu. Ten niedostatek metody można wyeliminować przyjmując $i_k = i_{k-1}$.

Przepływ wody po powierzchni zlewni

Gdyby za czas przepływu wody do rozpatrywanego przekroju przyjąć tylko czas przepływu siecią kanalizacyjną, wówczas przy obliczaniu początkowych odcinków kanałów należałoby przyjmować czas $t_{k-1} = 0$. Jednakże czas przepływu w sieci kanalizacyjnej wydłuża się o czas przepływu wody po powierzchni zlewni i dlatego w tych przypadkach przyjmuje się $t_{k-1} = t_p$, gdzie t_p jest czasem przepływu wody po powierzchni zlewni z jej najodleglejszego miejsca do kanału. Do obliczenia czasu przepływu t_p stosuje się doświadczalny wzór Hic-kse-Terstreipa [2, 5]:

$$t_p = 3,696 b^{0,323} \psi^{-0,64} i^{-0,64} J^{-0,148}, \text{ min} \quad (16)$$

gdzie:

b — długość drogi wody, m

ψ — średni współczynnik spływu powierzchniowego

i — natężenie deszczu, dm^3/sha

J — średni spadek terenu zlewni (w kierunku drogi przepływu wody).

Czas przepływu t_p obliczamy najpierw dla deszczu i_{15} o czasie trwania 15 min i jeśli $t_p \leq 15$ min to przyjmuje się wartość t_p do dalszych obliczeń, jeśli natomiast $t_p > 15$ min, wówczas poszukuje się deszczu krytycznego o czasie trwania równym czasowi przepływu wody po terenie zlewni. W tym przypadku korzysta się z zależności:

$$t_p = \left(\frac{7,7105}{\psi A} b^{0,5047} J^{-0,7} \right)^{1,5625} - m, \text{ min} \quad (17)$$

gdzie: A, m — parametry do wzoru Lindleya. Natężenie deszczu krytycznego odpowiadające czasowi trwania t_p oblicza się z zależności:

$$i_p = A \cdot t_p^{-m} \quad (18)$$

Czas przepływu wody po powierzchni terenu zlewni uwzględnia się w obliczeniach hydraulicznych kolejnych odcinków dopóty, dopóki jest on większy od czasu przepływu ścieków od początku kanału do rozpatrywanego przekroju. Gdy czas przepływu ścieków od początku kanału jest większy od 20 min, wówczas w obliczeniach nie uwzględnia się czasu przepływu po powierzchni terenu zlewni.

Obliczanie sieci na mikrokomputerze

Na początku obliczeń wprowadza się następujące dane wstępne: liczbę odcinków sieci, parametry A i m do wzoru Lindleya (podaje się szereg wartości czasów trwania i natężeń deszczu, na podstawie których mikrokomputer obliczy wartości tych parametrów) oraz współczynnik szorstkości kanałów, jeśli jest on jednakowy dla całej sieci. Następnie wprowadza się informacje o strukturze sieci. Węzły sieci numeruje się w kolejności liczb naturalnych, przy czym żadna kolejna liczba nie może być pominięta, a dwa różne węzły nie mogą mieć tego samego numeru. Węzły można numerować w dowolnej kolejności. Odcinek sieci zapisywany jest jako para liczb, przy czym jako pierwszą liczbę zapisuje się numer węzła początkowego odcinka. Kolejność zapisywania odcinków jest dowolna.

Wszystkie pozostałe dane wprowadzane są w czasie obliczeń. Mikrokomputer poszukuje kolejnego odcinka obliczanego kanału i żąda następujących danych: długość odcinka, spadek kanału, współczynnik chropowatości kanału, powierzchnia zlewni i współczynnik spływu. Jeśli przy obliczaniu odcinka uwzględnia się czas przepływu po powierzchni zlewni, to mikrokomputer żąda jeszcze długości drogi wody po terenie zlewni i średniego spadku terenu w kierunku drogi wody. Po wykonaniu obliczeń hydraulicznych odcinka drukowane są następujące wyniki: sumaryczny czas przepływu kanałem, natężenie deszczu obliczeniowego, natężenie przepływu, wymiar kanału, prędkość przepływu i wysokość napełnienia. Następnie mikrokomputer poszukuje kolejnego odcinka w kierunku przepływu ścieków i obliczenia są kontynuowane. Po wykonaniu obliczeń wszystkich odcinków komputer oznajmia, że był obliczony ostatni odcinek.

Obecnie prowadzone są prace nad testowaniem oraz dalszym ulepszaniem programu.

LITERATURA

1. M. DESBORDES: Reflexion sur les méthodes de calcul des réseaux urbains d'assainissement pluviel. Thèse pour obtenir le grade de Docteur-Ingenieur, Academie de Montpellier, 1974.
2. W. I. HICKS: A method of computing urban runoff. Transaction ASCE, vol. 109, p. 1227—1253, 1944.
3. C. G. IZZARD: Hydraulics of runoff from developed surfaces. Proceedings of the 26 th annual meeting Highway Research Board, vol. 26, p. 129—146, 1946.
4. M. ŠEREK, J. ŠÁLEK, J. MIČÍN: Stokování a odvodnění — vodohospodářské tabulky. SNTL, Praha 1935.
5. M. L. TERSTREIP, J. B. STALL: Urban runoff by the Road Research Laboratory Method. Proceedings of the ASCE — Journal of the Hydraulics division, vol. 95 Hy 6, p. 1809—1839, 1969.
6. J. TRUPL: Intensity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy. VÚV Praha, 1958.

M. Šerek

STORM SEWER CALCULATIONS INVOLVING MICROCOMPUTERS

The algorithm for storm sewer network calculations on a 64 kB operating store microcomputer is establi-

shed. Conversational processing reduces markedly the information content to be stored, thus enabling calculations for storm sewer networks consisting of 1000 or more sections. The method applies to sewers of a circular section only, provided that the critical-rainfall is involved.