

## PROJEKTOWANIE I ANALIZA SIECI KANALIZACJI DESZCZOWEJ Z UWZGLĘDNIENIEM SIECIOWYCH ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH NA EMC

Projektowanie kanalizacji metodami tradycyjnymi jest uciążliwe i pracochłonne. Dodatkową trudność stwarza obliczenie przepływu w sieci kanalizacyjnej, wywołanego spływem deszczowym, przy użyciu obowiązującej w Polsce metody granicznych natężeń.

Zadania stawiane przed projektantami układów kanalizacyjnych rosną w miarę urbanizacji kraju. Jednym ze sposobów zwiększenia wydajności biur projektowych i podniesienia jakości projektowanych rozwiązań jest szersze wprowadzenie do codziennej praktyki inżynierskiej elektronicznej techniki obliczeniowej.

Wychodząc naprzeciw tym potrzebom, w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej opracowany został program KDW, służący do projektowania i analizy zewnętrznej sieci kanalizacji deszczowej wraz z projektowaniem i obliczaniem zbiorników retencyjnych, przy wykorzystaniu maszyn serii ODRA 1305. Obliczana sieć może mieć praktycznie dowolną liczbę odcinków.

### Zakres programu

Omawiany program służy do obliczeń projektowych krytych, rozgałęznych, wykonywanych z rur o przekroju kołowym, zewnętrznych sieci kanalizacji deszczowej. Do uruchomienia programu potrzebna jest minimalna ilość podstawowych danych wejściowych, dotyczących kanalizowanego terenu, sieci i przewidywanych zbiorników. Jeśli chodzi o teren i sieć, są to następujące informacje: układ geometryczny sieci, rzeźba terenu, powierzchnie zredukowane zlewni, średni roczny opad z wielolecia, częstotliwość deszczu miarodajnego, wymagana dokładność obliczania prędkości, wymagane minimalne przykrycia kanałów, maksymalna dopuszczalna głębokość wykopów, maksymalna dopuszczalna prędkość przepływu ścieków w kanałach oraz współczynnik „n” do wzoru Manninga. Cztery ostatnie parametry mogą być ustalone w odniesieniu do całej sieci lub dla poszczególnych odcinków kanałów. Do analizy istniejących sieci konieczna jest znajomość średnic, rzędnych dna lub spadków kanałów. Pozostałe wielkości wyznaczone są automatycznie podczas obliczeń. Dane potrzebne do projektowania zbiorników retencyjnych są nastę-

pujące: głębokość ścieków w zbiorniku na jego początku (licząc od najniższej położonego zwierciadła ścieków w jednym z kanałów dopływowych), spadek podłużny i poprzeczny dna zbiornika, średnica graniczna kanału, po przekroczeniu której projektowany jest na danym odcinku zbiornik retencyjny, stosunek natężenia odpływu do natężenia dopływu ścieków do zbiornika, różnica poziomu dna zbiornika na odpływie i dna kanału odpływowego tuż za urządzeniem dławiącym.

Zbiornik retencyjny projektowany jest zawsze na początku odcinka, którego obliczona wcześniej średnica przekracza średnicę graniczną; przyjęcie odpowiednio zmniejszonego odpływu ze zbiornika powoduje, że średnica tego odcinka będzie ostatecznie mniejsza od granicznej. Program umożliwia rozwiązanie następujących zadań:

- analizę hydrauliczną sieci o znanych średnicach i spadkach kanałów,
- projektowanie spadków odcinków sieci o znanych średnicach kanałów,
- projektowanie średnic kanałów o znanych spadkach,
- projektowanie spadków i średnic kanałów,
- dowolną kombinację powyższych zadań,
- projektowanie zbiorników retencyjnych na sieci.

Wybór zadania następuje w zależności od sposobu wypełnienia formularza danych wejściowych oraz pośrednich wyników obliczeń. Po zakończeniu obliczeń drukowane są wszystkie parametry konstrukcyjne i hydrauliczne projektowanej i analizowanej sieci, jak: długości odcinków, średnice i spadki kanałów, napełnienia i prędkości przepływu ścieków, rzędne dna kanałów w węzłach. Podawana jest ewentualna lokalizacja pompowni strefowych i kaskad a także informacja o pracy odcinka sieci pod ciśnieniem, gdy ten przypadek ma miejsce. Odnośnie zbiorników retencyjnych drukuje się: objętości ścieków w poszczególnych zbiornikach, długości, szerokości i głębokości na początku i końcu każdego zbiornika oraz współczynniki dławienia „k” przy wypływie (do wzoru  $\Delta h = k q^2$ ). Ponadto drukowana jest objętość robót ziemnych przy budowie sieci i zestawienie długości przewodów wg średnic.

## Podstawy obliczeniowe

### Natężenia przepływu ścieków deszczowych

Natężenia przepływu ścieków deszczowych obliczane są wg obowiązującej w Polsce metody granicznych natężeń. Podstawą do obliczania natężenia deszczu miarodajnego jest czas „ $t_p$ ” przepływu ścieków w kanale, zależny od prędkości przepływu ścieków „ $v$ ” i długości kanału „ $l$ ”:

$$t_p = \frac{l}{v} \quad (1)$$

Natężenie przepływu ścieków deszczowych oblicza się ze wzoru:

$$Q_d = \frac{6.631 \sqrt[3]{H^2 \cdot c}}{(1,2 \cdot t_p + t_k)^{0,67}} \cdot F_{zr} \quad [\text{dm}^3/\text{s}] \quad (2)$$

gdzie:

$H$  — średni roczny opad z wielolecia dla danej miejscowości, mm;

$c$  — częstotliwość występowania deszczu miarodajnego dla danego odcinka sieci, lata;

$t_k$  — czas koncentracji terenowej wg Wytycznych [4], min;

$F_{zr}$  — zredukowana powierzchnia zlewni, z której spływają ścieki deszczowe przepływające przez obliczany przekrój kanału, ha.

w odniesieniu do przekroju początkowego i końcowego odcinka, a do wymiarowania przekroju kanału wybierany jest większy przepływ. Sposób obliczania miarodajnego natężenia przepływu ścieków wyjaśniono w oddzielnym rozdziale. W przypadku zaprojektowania na kanale zbiornika retencyjnego, wylot ze zbiornika przyjmowany jest w dalszych obliczeniach jako węzeł początkowy odcinka położonego poniżej. Czas przepływu ścieków liczy się w takim przypadku ponownie od zera, a jednocześnie dodawany jest dopływ początkowy równy natężeniu wypływu ze zbiornika.

### Przekroje kanałów

W kanalizacji deszczowej zgodnie z Wytycznymi [4] stosuje się przewody o średnicy nie mniejszej niż 0,25 m. W programie przyjęto następujące średnice: 0,25, 0,3, 0,4 itd. co 0,1 m aż do 3,0 m. Do obliczania natężenia i prędkości przepływu ścieków przy całkowitym napełnieniu kanałów wykorzystany został wzór Manninga. Przy doborze średnic przyjęto zasadę, że projektowana średnica danego odcinka nie może być mniejsza od średnic odcinków poprzedzających odcinek obliczany. Do obliczania napełnień kanałów i prędkości przepływu ścieków, przy częściowym napełnieniu wykorzystano krzywe sprawności opracowane przez Thormanna [3].

### Spadki kanałów

Spadki minimalne dna kanału obliczane są wg formuły:

$$i_{\min} = \frac{100}{d} \quad [‰] \quad (3)$$

gdzie:

$d$  — średnica wewnętrzna kanału, cm.

Spadek minimalny nie może być jednak mniejszy od 1‰; jeśli konieczne jest odstąpienie od tej zasady należy to uwidocznic przy wypełnianiu formularza danych. Projektowane w ten sposób spadki minimalne zapewniają, zgodnie z Wytycznymi [4], prędkość przepływu ścieków przy całkowitym napełnieniu w wysokości 0,8 m/s. Spadki maksymalne są wyznaczane na podstawie maksymalnej dopuszczalnej prędkości przepływu ścieków. Projektowane przez program spadki kanałów są zawsze zawarte między spadkiem minimalnym i maksymalnym.

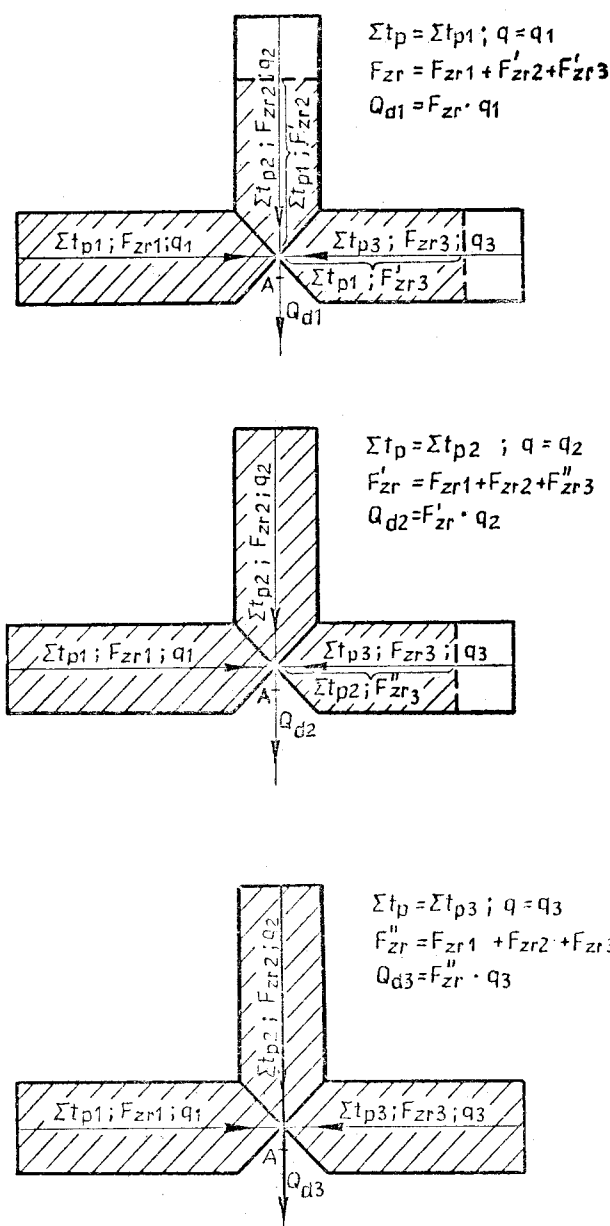
### Zakres procedur obliczeniowych i ich ograniczenia

Kolejność obliczeń odcinków ustalana jest automatycznie. W programie KDW konieczne jest jednak, aby odcinki sieci wpisywane były do formularza danych i wprowadzane do maszyny w kolejności, zgodnej z kierunkiem spływu ścieków i łączeniem się kanałów, gdyż obliczanie sieci kanalizacyjnej rozpoczyna się od odcinków początkowych. Spadki i średnice kanałów są ze sobą ściśle związane, dlatego zmiana spadku powoduje zawsze korektę średnicy (z wyjątkiem analizy istniejącej sieci). Każdy odcinek kanału zostaje zaprojektowany z możliwie najmniejszym spadkiem; jednak nie mniejszym od minimalnego. Gdy mimo zaprojektowania spadku minimalnego, zagłębienie dna kanału przekroczy w węźle końcowym wartość maksymalną dopuszczalną, wówczas zostanie na nim zlokalizowana przepompownia ścieków. Natomiast w przypadku, gdy zostanie zaprojektowany spadek maksymalny, a mimo to przykrycie sklepienia kanału w końcowym węźle będzie mniejsze od minimalnego, wówczas zostanie na nim zlokalizowana kaskada. Sposób określenia lokalizacji kaskad i przepompowni na odcinkach sieci ilustruje rys. 2.

W programie nie przewidziano możliwości projektowania i analizy przewodów tłocznych. Jeśli przy analizie istniejącej sieci przepływność odcinka sieci jest mniejsza od ilości odprowadzanych ścieków, to sygnalizowany jest przypadek pracy odcinka pod ciśnieniem. Obliczany wówczas spadek jest spadkiem linii ciśnienia. Przyjęto następujące możliwości wysokościowego łączenia kanałów w węzłach:

— zrównanie zwierciadła ścieków w kanale odprowadzającym z najniższym położonym zwierciadłem ścieków w kanale doprowadzającym,

— zrównanie sklepień kanału odprowadzającego i najwyższego położonego sklepienia kanału doprowadzającego do węzła, przy jednoczesnym sprawdzeniu czy dno kanału odprowadzającego jest położone niżej od dna wszystkich kanałów doprowadzających — jeśli nie, to wówczas sklepienie odcinka odpływowego zostaje zrównane ze sklepieniem następnego, głębiej położonego sklepienia kanału doprowadzającego i ponownie zostaje sprawdzane, czy dno kanału odprowadza-



Rys. 1 Określenie przepływu obliczeniowego w górnym węźle odcinka kanału

jącego leży niżej od dna wszystkich pozostałych kanałów doprowadzających, itd.,

— zrównanie osi kanału odprowadzającego, z najwyższą położoną osią kanału doprowadzającego, przy jednoczesnym sprawdzeniu, czy dno kanału odprowadzającego jest położone niżej od dna wszystkich kanałów doprowadzających — jeśli nie, to wówczas oś odcinka odpływowego zostaje zrównana z osią następnego kanału, głębiej położoną i ponownie zostaje sprawdzane czy dno kanału odprowadzającego leży niżej od dna wszystkich pozostałych kanałów doprowadzających, itd.

Wybór jednego z tych sposobów zależy od sposobu wypełnienia formularza danych wejściowych. Program realizuje obliczenia tylko wówczas, gdy w węźle schodzą się nie więcej niż cztery kanały: jeden odprowadzający i trzy doprowadzające. To ograniczenie można

ominać przyjmując w odległości 0,0 od węzłów rzeczywistych węzły fikcyjne, do których można dołączyć po dwa dalsze kanały. W punktach o wyraźnych zmianach spadku należy przyjmować również węzły obliczeniowe. Numer węzła obliczeniowego nie może być zerem.

## Omówienie procedury do obliczania natężenia przepływu ścieków deszczowych

Jako pierwsze oblicza się początkowe odcinki sieci. W pierwszym przybliżeniu przyjmowana jest prędkość przepływu ścieków przez odcinek w wysokości  $v_z = 1,0$  m/s. Ze wzoru (1) obliczany jest czas przepływu ścieków „ $t_p$ ”, a następnie miarodajny czas trwania deszczu obliczeniowego ze wzoru:

$$t_{dm} = 1,2 t_p + t_k \quad [\text{min}] \quad (4)$$

Natężenie deszczu miarodajnego określa wzór:

$$q = \frac{6.631 \sqrt{H^2 c}}{t_{dm}^{0.67}} \quad [\text{dm}^3/\text{s}] \quad (5)$$

Odprawy ścieków deszczowych „ $Q_d$ ” w końcowym przekroju odcinka wyznaczamy ze wzoru (2). Wartość „ $Q_d$ ” stanowi podstawę do doboru średnicy i spadku kanału, a następnie wyznaczenia średniej prędkości przepływu „ $v$ ”. Prędkość ta jest porównywana z prędkością założoną na wstępie „ $v_z$ ”; jeśli różnica będzie mniejsza od dopuszczalnej odchyłki „ $\epsilon_v$ ” to obliczenie odcinka jest zakończone, jeśli nie to obliczenia są powtarzane do osiągnięcia różnicy mniejszej od „ $\epsilon_v$ ”. W kolejnych krokach przyjmowana jest prędkość wyznaczona w krokach poprzednich.

Dla dalszych odcinków sieci (poza początkowymi) obliczenie przepływu w końcowym węźle odcinka przeprowadza się podobnie z tym, że zamiast „ $t_p$ ” oblicza się sumę czasu przepływu „ $\Sigma t_p$ ” ścieków deszczowych, od początku sieci aż do obliczanego przekroju ze wzoru:

$$\Sigma t_p = \sum_{i=1}^{n-1} t_{pi} + t_{pn} \quad [\text{min}] \quad (6)$$

gdzie:

$t_{pn}$  — czas przepływu na n-tym, obliczanym odcinku sieci, min.

$t_{pi}$  — czas przepływu przez i-ty odcinek kanału, min.;

a miarodajny czas trwania deszczu obliczeniowego ze wzoru:

$$t_{dm} = 1,2 \Sigma t_p + t_k \quad [\text{min}] \quad (7)$$

Gdy początkowy węzeł obliczanego odcinka jest jednocześnie węzłem końcowym więcej niż jednego odcinka doprowadzającego, powstaje problem właściwego wyboru czasu „ $\Sigma t_p$ ” dopływu ścieków do tego węzła, a więc również do przekroju położonego tuż powyżej węzła końcowego obliczanego odcinka. W programie KDW rozwiązano to następująco:

— jeśli kanały doprowadzające różnią się przyjętą częstotliwością „ $c$ ” występowania

deszczu miarodajnego, to do dalszych obliczeń brana jest wartość „ $\Sigma t_p$ ” tego kanału, dla którego „ $c$ ” ma największą wartość,

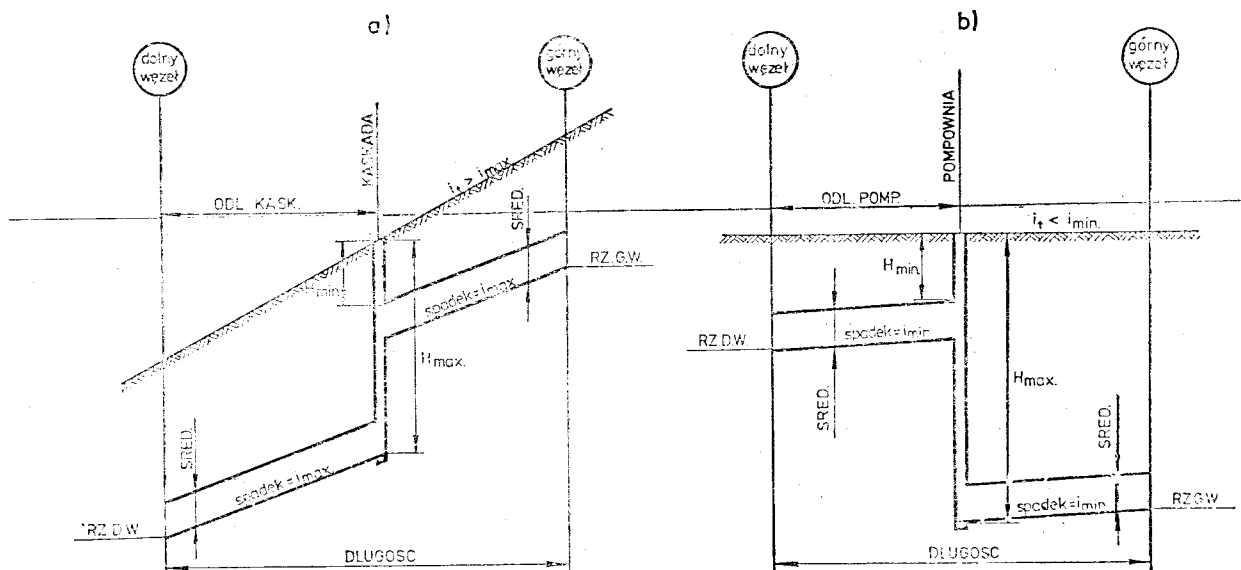
— gdy dwa lub więcej kanałów doprowadzających posiada identyczną wartość „ $c$ ” wybierana jest największa z wartości  $\Sigma t_{pi}$  tych kanałów.

We wszystkich odcinkach kanałów (poza początkowym) porównywane są przepływy miarodajne ścieków deszczowych obliczone dla przekroju, tuż za węzłem początkowym z przepływami obliczonymi dla końcowego przekroju odcinka. Jeśli ścieki doprowadza do węzła początkowego tylko jeden kanał, to porównanie dotyczy ilości ścieków deszczowych obliczonych dla końcowego przekroju poprzedniego odcinka z ilością obliczoną dla końcowego przekroju obliczanego odcinka. Kiedy jednak do węzła początkowego ścieki dopływają więcej niż jednym kanałem, to przepływ ścieków deszczowych w początkowym przekroju odcinka obliczany jest następująco:

— zakłada się liniowy przyrost zlewni na całej długości każdego z kanałów doprowadzających ścieki do węzła początkowego,

— rozpatruje się kolejno czasy przepływu  $\Sigma t_p = \Sigma t_{pi}$  przez wszystkie „ $i$ ”-te kanały doprowadzające ścieki do węzła początkowego, biorąc pod uwagę odpowiadające im różne wartości natężeń deszczu, różne powierzchnie i różne długości; oblicza się w nich w ten sposób różne natężenia przepływu ścieków deszczowych, w początkowym przekroju „ $A$ ” obliczanego odcinka. Sposób obliczania przy założeniu  $\Sigma t_{p1} < \Sigma t_{p2} < \Sigma t_{p3}$  wyjaśniają schematy na rys. 1.

Po obliczeniu w powyższy sposób dwóch lub trzech wartości „ $Q_d$ ”, dla początkowego przekroju danego odcinka, wybierana jest największa z nich i porównywana z wartością natężenia przepływu ścieków deszczowych w końcowym przekroju odcinka. Do wymiarowania przekroju kanału na tym odcinku przyjmowana jest większa z obu wartości.



Rys. 2 Zakres projektowania: a) kaskad, b) pompowni strefowych, na odcinkach sieci kanalizacyjnej

## Procedura do obliczania objętości robót ziemnych

Objętość robót ziemnych obliczana jest przy założeniu, że rodzaj gruntu (suchy lub nawodniony) zadaje projektant w danych wejściowych. Również do projektanta należy wprowadzenie w danych wejściowych obustronnej grubości bali odeskowania wykopu. Objętość robót ziemnych dla odcinka kanału obliczana jest ze wzoru:

$$V = F \cdot b \quad [m^3] \quad (8)$$

gdzie:

- F — powierzchnia ściany bocznej wykopu,  $m^2$
- b — szerokość wykopu uzależniona od średnicy kanału, nawodnienia gruntu i grubości bali odeskowania, m.

Powierzchnię ściany bocznej oblicza się ze wzoru:

$$F = H_{sr} \cdot L \quad [m^2] \quad (9)$$

gdzie:

- $H_{sr}$  — średnia głębokość wykopu na odcinku, m,
- L — długość odcinka kanału, m.

W obliczeniach uwzględnione zostają profile kanału zniekształcone zarówno przez kaskady jak i przez pompownie strefowe, o ile występują na odcinkach. Obliczone dla poszczególnych odcinków objętości robót ziemnych są sumowane, aby po obliczeniu końcowego odcinka sieci wydrukować objętość wykopów w całej sieci. W programie sumowane są również długości kanałów o jednakowych średnicach i wykonane zestawienie zaprojektowanych przewodów wg średnic.

## Procedura projektująca zbiorniki retencyjne

Zbiornik retencyjny lokalizowany jest tuż za początkowym węzłem tych odcinków, na których średnica zaprojektowanego kanału wypada większa od średnicy granicznej, wprowadzonej w danych wejściowych. Objętość ścieków w zbiorniku retencyjnym obliczana jest ze wzoru:

$$V_{zb} = Q_{dopl} t_p f(\beta) \quad [m^3] \quad (10)$$

gdzie:

$Q_{dopl}$  — natężenie dopływu ścieków do zbiornika,  $m^3/s$ ,

$t_p$  — czas przepływu ścieków przez kanał od początku kolektora do przekroju zbiornika, s,

$$\beta = Q_{odpl} / Q_{dopl}$$

gdzie:

$Q_{odpl}$  — natężenie wypływu ze zbiornika,  $m^3/s$ ,

$f(\beta)$  — obliczona wg [1].

Szerokość zbiornika obliczana jest automatycznie metodą kolejnych przybliżeń, przy czym punktem wyjścia jest objętość zbiornika wyliczona wg wzoru (10) oraz zadane przez projektanta w danych wejściowych: spadek podłużny i poprzeczny dna zbiornika oraz głębokość ścieków w zbiorniku przy wlocie kanału dopływowego. Długość i szerokość zbiornika związane są zależnością:

$$b = n_z \cdot a \quad [m] \quad (11)$$

gdzie:

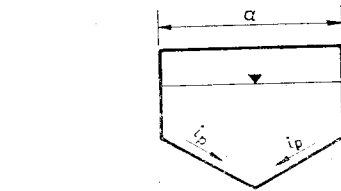
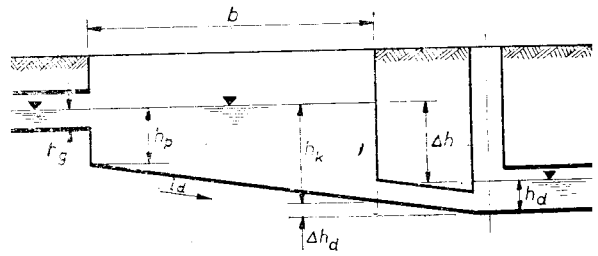
$b$  — długość zbiornika, m,

$n_z$  — zadany przez projektanta stosunek długości do szerokości zbiornika,

$a$  — szerokość zbiornika, m.

W przypadku, gdy w węźle schodzą się trzy kanały, a za nim zlokalizowany jest zbiornik, to wówczas do obliczenia objętości ścieków w zbiorniku będzie brana maksymalna wartość z iloczynów:  $Q_{d1} \cdot \Sigma t_{p1}$ ,  $Q_{d2} \cdot \Sigma t_{p2}$ ,  $Q_{d3} \cdot \Sigma t_{p3}$ .

Sposób wyznaczania  $Q_{d1}$ ,  $Q_{d2}$ ,  $Q_{d3}$  pokazano na rys. 1.



Rys. 3 Schemat zbiornika retencyjnego

Współczynnik strat na urządzeniu dławiącym wypływ ze zbiornika (rura dławiąca, zastawka, zasawa, itp.) obliczany jest ze wzoru:

$$k = \Delta h / Q_{odpl}^2 \quad [s^2/m^5] \quad (12)$$

gdzie:

$\Delta h$  — sumaryczna strata wysokości ciśnienia na urządzeniu dławiącym równa różnicy zwierciadeł w zbiorniku i kanale odpływowym, m.

Na rys. 3 pokazano schemat zbiornika retencyjnego. Jeśli chcemy zaprojektować sieć bez zbiorników retencyjnych, wystarczy zadać dużą wartość średnicy granicznej.

## LITERATURA

1. W. BEASZCZYK, M. ROMAN, H. STAMATELLO: Kanalizacja cz. 1 Arkady, Warszawa 1974 r.
2. E. WL. MIELCARZEWICZ, J. WARTALSKI: Obliczanie sieci kanalizacyjnych na maszynach cyfrowych. Konferencja PZiTS, Wrocław, 1975 r.
3. R. RANDOLF: Kanalisation und Abwasserbehandlung, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1966.
4. Wytyczne projektowania miejskich sieci kanalizacyjnych, Dziennik Budownictwa Nr 15 p. 64, 1965 r.
5. J. WARTALSKI, E. WL. MIELCARZEWICZ, K. BIELECKI, A. WARTALSKI: Opracowanie metody automatycznego projektowania i analizy hydraulicznej rozdzielczego systemu usuwania ścieków, Raport Inst. Inż. Ochr. Środ. Pol. Wrocławskiej.