



WOJCIECH SZPAKOWSKI

Politechnika Gdańska
wojciech.szpakowski@
willis.pg.gda.pl

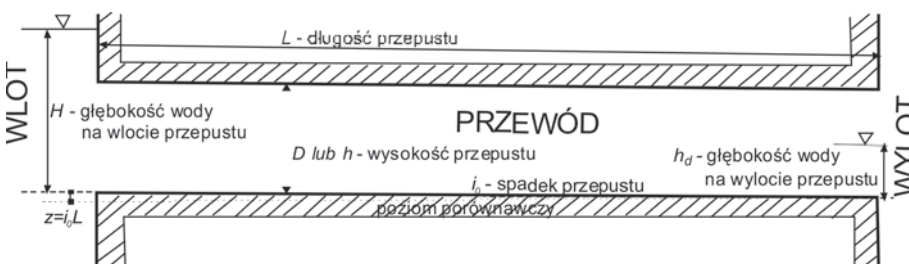
Przepustowość przepustu niezatopionego

Głównym zadaniem przepustów, jako drogowych obiektów inżynierskich, jest umożliwienie przepływu wód w ciekach przechodzących pod koroną drogi. Przepustowość przepustu uzależniona jest od zachodzących zjawisk meteorologicznych

i procesów hydrologicznych w zlewni. Przepusty projektuje się na przepływ miarodajny, uzależniony od przyjętej wartości prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska. W zależności od klasy drogi i rodzaju przepustu (trwały, tymczasowy), zgodnie z § 40 obowiązującego w Polsce Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. [4], w obliczeniach przyjmuje się prawdopodobieństwo wystąpienia przepływu od 5% (woda dwudziestoletnia) do 1% (woda stuletnia).

W konstrukcji przepustu wyróżnić można konstrukcję wlotową, przewód przepustu oraz konstrukcję wylotową (rys. 1).

Biorąc pod uwagę wytyczne zawarte w § 46 rozporządzenia [4], przepusty najczęściej projektuje się tak, aby przy przepływie miarodajnym ich wlot nie był zatopiony. Zdarza się jednak, że projektanci opierają się jedynie o wytyczne zawarte w § 45 rozporządzenia [4] i dobierają parametry obiektu biorąc jedynie pod uwagę warunki przepływu ze swobodną powierzchnią w przewodzie przepustu. Ponieważ takie podejście nie zawsze jest korzystne [3], podstawowe różnice w obliczeniach pokazano w niniejszym artykule.



Rys. 1. Schemat ideowy przepustu z zaznaczeniem charakterystycznych wielkości

podniesienie się poziomu wody i zatopienie wlotu przepustu. W takim przypadku w przewodzie może wystąpić zarówno przepływ pod ciśnieniem, jak i ze swobodną powierzchnią wody. W przypadku równoczesnego zatopienia wlotu i wylotu przepustu, jego przewód całkowicie wypełni się wodą.

Analiza przypadków przepływu wody przy niezatopionym wylocie przepustu (tab. 1) pokazuje, że przepływ ze swobodną powierzchnią w przewodzie może wystąpić w dwóch podstawowych przypadkach: podczas zatopienia wlotu przy odpowiednim spadku przewodu oraz przy niezatopionym wlocie. Jeżeli jedną z wytycznych projektowych jest przyjęcie niezatopionego wlotu przepustu, to przy niezatopionym wylocie woda w przewodzie przepustu będzie zawsze płynąć w warunkach bezcisnieniowych.

Tabela 1. Typowe formy przepływu wody w przewodzie przepustu w zależności od warunków hydraulicznych na wlocie i wylocie przepustu

		wylot przepustu	
		zatopiony	niezatopiony
wlot przepustu	zatopiony	przepływ pod ciśnieniem	przepływ ze swobodnym zwierciadłem
			przepływ pod ciśnieniem
			przepływ mieszany
	niezatopiony	przepływ mieszany	przepływ ze swobodnym zwierciadłem

Wydatek przepustu ze swobodną powierzchnią

Formuły pozwalające wyznaczyć wydatek przepustu zakładają ustalone warunki przepływu. W przewodzie przepustu dodatkowo zakłada się występowanie jednostajnego ruchu wody, do którego opisu można wykorzystać formułę Manninga:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R_N^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot A_N = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{A_N}{O_{z_N}} \right)^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot A_N \quad (1)$$

w której:

- A_N – pole przekroju czynnego przewodu przy głębokości normalnej h_N ; $A_N = h_N$ dla przekroju prostokątnego, $A_N = f(D, h_N)$ dla przekroju kołowego;
- b – szerokość zwierciadła wody w przekroju poprzecznym przewodu;
- D – średnica wewnętrzna przekroju kołowego;

Teoretyczne warunki przepływu wody w przepuście

Przepusty mogą pracować w różnych warunkach hydraulicznych wynikających z poziomów wody na wlocie i wylocie przepustu (rys. 2). Przepływająca woda najczęściej nie przekracza poziomu górnej krawędzi przewodu przepustu, zarówno od jego strony wlotowej, jak i wylotowej, co odpowiada warunkom niezatopionego wlotu i wylotu przepustu. W takich warunkach w przewodzie występuje swobodne zwierciadło wody. Zwiększenie natężenia przepływu powoduje

- h_N – głębokość normalna w przekroju poprzecznym przewodu;
- n – współczynnik szorstkości materiału przewodu wg Manninga;
- I – spadek hydrauliczny wody w przewodzie, który w założonych warunkach ruchu jest równy spadkowi zwierciadła wody oraz spadkowi dna przewodu przepustu (i_0);
- R_N – promień hydrauliczny przekroju czynnego przewodu przy głębokości normalnej h_N ;
- Oz_N – Obwód zwilżony przekroju czynnego przewodu przy głębokości normalnej h_N .

Rozpatrując przepływ ustalony w warunkach niezatopionego wylotu przepustu – w przewodzie tworzyć się może swobodne zwierciadło wody w dwóch podstawowych przypadkach:

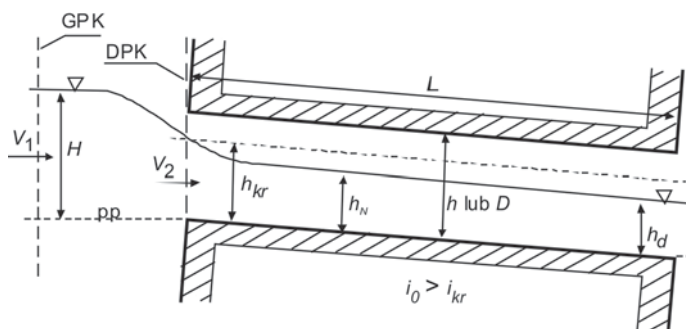
1. Przepływ w warunkach niezatopionego wlotu przepustu (rys. 2 i 3).
2. Przepływ w warunkach zatopionego wlotu przepustu, przy czym głębokość normalna w przewodzie musi być mniejsza od wysokości przepustu (rys. 4). W innym przypadku woda może wypełnić całą objętość przewodu, tworząc ciśnieniowe warunki przepływu.

Przepływ wody w przepuszczeniu w warunkach niezatopionego wlotu i wylotu pomiędzy przekrojami GPK-DPK opisują: równanie Bernoulliego (2) otrzymane przy założeniu braku strat energii oraz równanie ciągłości (3).

$$H + \frac{V_1^2}{2g} = h_{kr} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2)$$

$$Q = V_{kr} \cdot A_{kr} \quad (3)$$

Kiedy przy braku dodatkowego podpiętrzenia wody na wylocie głębokość normalna w przewodzie jest mniejsza od głębokości krytycznej, co zachodzi przy większym od spadku krytycznego spadku przewodu, woda płynie ruchem rwącym. Tym samym warunki przepływu zależą tylko od konstrukcji wlotowej (rys. 2).



Rys. 2. Schemat pracy przepustu w warunkach niezatopionego wlotu i wylotu. W przewodzie przepustu występuje ruch rwący ($i_0 > i_{kr}$) H – wysokość zwierciadła wody na wlocie ponad dolną krawędź przepustu (obciążenie przepustu), h – wysokość przepustu, L – długość przepustu, h_d – wysokość wody ponad dolną krawędź na wylocie z przepustu, h_{kr} – głębokość krytyczna, h_N – głębokość normalna, i_0 – spadek przepustu, i_{kr} – spadek krytyczny, V_1, V_2 – średnia prędkość wody w przekroju poprzecznym kanału lub przewodu, GPK – górny przekrój kontrolny, DPK – dolny przekrój kontrolny

Górny przekrój kontrolny znajduje się przed wlotem do przepustu. Dolny przekrój kontrolny położony jest w przewodzie w rejonie wlotu, gdzie występuje ruch krytyczny, zaś głębokość wody równa jest głębokości krytycznej. V_1 i V_2 oznaczają średnią prędkość wody odpowiednio w górnym i dolnym przekroju kontrolnym, przy czym ze względu na ruch krytyczny w DPK $V_2 = V_{kr} \cdot A_{kr}$ oznacza pole przekroju czynnego odpowiadającego głębokości krytycznej. Po uwzględnieniu strat energii mechanicznej w rejonie wlotu przepustu współczynnikiem empirycznym C_D , uzyskano formułę na wydatek przepustu Q :

$$Q = C_D \cdot A_{kr} \cdot \sqrt{2g \cdot \left(H + \frac{V_1^2}{2g} - h_{kr} \right)} \quad (4)$$

Występującą w formule (4) głębokość krytyczną wyznaczyć można z równania ruchu krytycznego:

$$\frac{A_{kr}^3}{b_{kr}} = \alpha \frac{Q^2}{g} \quad (5)$$

w którym α jest współczynnikiem de Saint Venanta. Dla prostokątnych przekrojów poprzecznych szerokość zwierciadła wody odpowiadająca głębokości krytycznej jest stała i równa szerokości przepustu ($b_{kr} = b$), zaś głębokość krytyczną można określić z zależności:

$$h_{kr} = \sqrt[3]{\alpha \frac{Q^2}{b^2 \cdot g}} \quad (6)$$

Dla innych kształtów przekroju poprzecznego przepustu głębokość krytyczną wyznacza się kolejnymi przybliżeniami, bowiem szerokość zwierciadła wody zmienia się wraz z głębokością.

W przypadku, kiedy głębokość normalna w przewodzie przepustu jest większa od głębokości krytycznej ($h_N > h_{kr}$), dolny przekrój kontrolny znajduje się na wylocie z przepustu (rys. 3). Zatem w równaniu (2) należy uwzględnić również straty na długości h_L wyznaczone przy wykorzystaniu przekształconego równania Manninga (1):

$$h_L = \frac{n^2 \cdot L \cdot Q^2}{R_N^{4/3} \cdot A_N^2} \quad (7)$$

Równanie Bernoulliego dla przypadku, kiedy na wylocie z przepustu panują warunki ruchu krytycznego (rys. 3a) ($h_d < h_{kr}$) zapisać można w postaci:

$$z + H + \frac{V_1^2}{2g} = h_{kr} + \frac{V_{kr}^2}{2g} + h_L \quad (8)$$

W tym przypadku ostateczna postać formuły na wydatek wody przez przepust Q po uwzględnieniu współczynnika C_D jest następująca:

$$Q = C_D \cdot A_{kr} \cdot \sqrt{2g \cdot \left(H + \frac{V_1^2}{2g} - h_{kr} - h_L \right)} \quad (9)$$

Kiedy głębokość wody na wylocie względem dolnej krawędzi przepustu jest większa od głębokości krytycznej (rys. 3b)

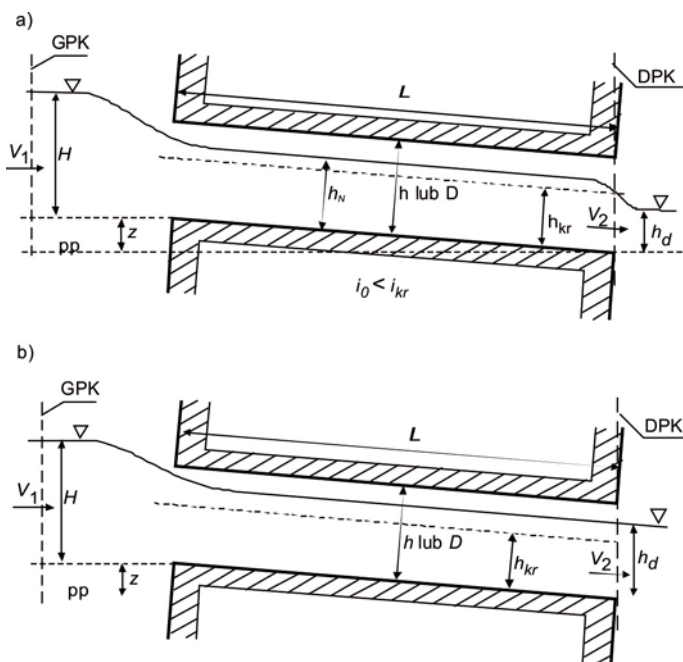
($h_d > h_{kr}$) w formule (9) parametry hydrauliczne w dolnym przekroju kontrolnym wynikają z wartości głębokości wody dolnej ($h_{kr} \rightarrow h_d, A_{kr} \rightarrow A_d$).

W rozporządzeniu [4] dla przepływu wody w warunkach niezatopionego wlotu i wylotu zalecana jest formuła jak dla przelewu o szerokiej koronie.

$$Q = m \cdot b_{kr} \cdot \sqrt{2g} \left(H + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{3/2} \quad (10)$$

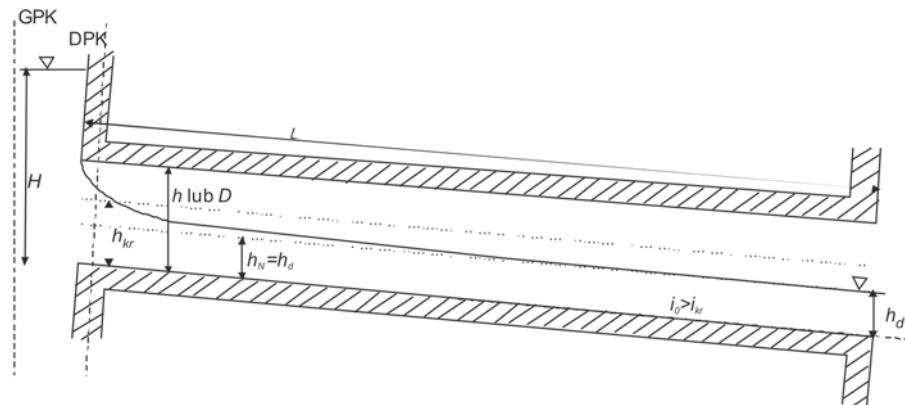
w której m jest współczynnikiem empirycznym. Powyższe wytyczne ograniczają stosowanie formuły (10) do przypadku ruchu spokojnego, ale jest ona powszechnie stosowana również w przypadku występowania ruchu rwącego.

Wartość b_{kr} oznaczające szerokość zwierciadła wody odpowiadającą głębokości krytycznej h_{kr} jest stała dla przewodów o przekroju prostokątnym. W przypadku innych przekrojów warunki techniczne [4] nakazują użycie formuły uproszczonej na wyznaczenie wielkości b_{kr} .



Rys. 3. Schemat pracy przepustu w warunkach niezatopionego wlotu i wylotu. W przewodzie przepustu występuje ruch spokojny. a) głębokość wody na wylocie z przepustu względem dolnej krawędzi przepustu jest mniejsza od głębokości krytycznej ($h_d < h_{kr}$). b) głębokość wody na wylocie z przepustu względem dolnej krawędzi przepustu jest większa od głębokości krytycznej ($h_d > h_{kr}$). Opis symboli na rys. 2

Swobodne zwierciadło wody w przewodzie może występować również podczas przepływu wody przy zatopionym wlocie i niezatopionym wylocie przepustu (rys. 4). Taki układ hydrauliczny wystąpi dla przepustów krótkich, jak również w przypadku, kiedy głębokość normalna będzie mniejsza od wysokości przepustu. W przekroju poprzecznym przewodu w rejonie wlotu przepustu powstaje głębokość krytyczna i wtedy proces przepływu poniżej wlotu nie ma wpływu na



Rys. 4. Schemat pracy ze swobodnym zwierciadłem wody w przewodzie przepustu w warunkach zatopionego wlotu i niezatopionego wylotu na przykładzie przepustu o spadku i_0 większym od spadku krytycznego. Opis symboli na rys. 3

wydatek przepustu. Dolny przekrój kontrolny usytuowany jest umownie w przekroju, w którym głębokość wody zależy od całkowitej wysokości przepustu i procesów kontrakcji na wlocie do przewodu.

Według wytycznych zawartych w rozporządzeniu [4] wydatek przepustu Q opisany jest formułą:

$$Q = \mu \cdot A_p \sqrt{2g \cdot \left(H + \frac{V_1^2}{2g} - \varepsilon \cdot D \right)} \quad (11)$$

w której μ i ε są współczynnikami empirycznymi. A_p oznacza całkowite pole przekroju przepustu zaś D wysokość przepustu.

Bodhaine [1] wobec znikomego udziału w całkowitej energii wody wysokości prędkości wody przed wlotem przepustu, pomija występujący w formule (11) człon $V_1^2/2g$. Formuła na wydatek zawiera jeden współczynnik empiryczny C_{D1} zależny od głębokości wody przed przepustem oraz samego kształtu konstrukcji wlotowej:

$$Q = C_{D1} \cdot A_p \sqrt{2g \cdot H} \quad (12)$$

Taki schemat obliczeniowy wykorzystuje się często określając maksymalną przepustowość przepustu, który pracuje w warunkach zatopionego wlotu [3].

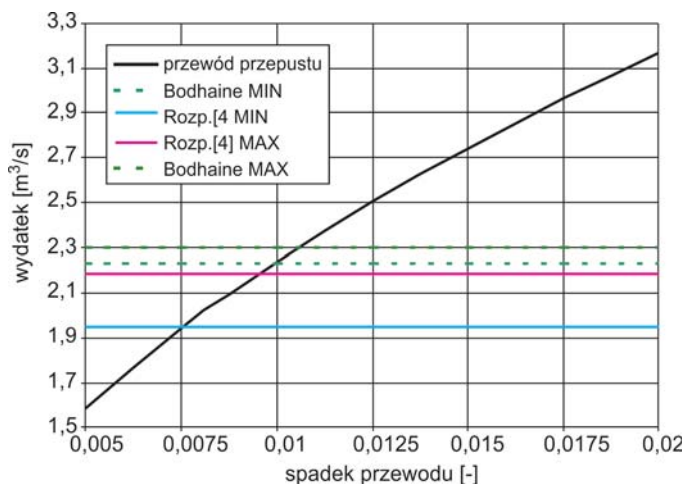
Obliczenia

Obliczenia wykonano dla przepustów o przekroju kwadratowym o wysokości $h = 1\text{m}$, oraz o przekroju kołowym o średnicy $h = D = 1\text{m}$. Współczynnik szorstkości charakteryzujący materiał z jakiego wykonany jest przepust przyjęto w dwóch wariantach: $n = 0,015\text{m}^{-1/3}\text{s}$ (odpowiadający powierzchni betonowej o średniej jakości) oraz $n = 0,010\text{m}^{-1/3}\text{s}$ (odpowiadający powierzchni gładkiej typu PCV, PE czy PP) [2]. W analizie uwzględniono spadek przepustu w zakresie od 0,5% (minimalne określone pochylenie dna przepustu ze względu na niebezpieczeństwo nadmiernego zamulania [4]) do 2% (granica stosowalności przepustów na wszystkich klasach dróg za wyjątkiem dróg lokalnych i dojazdowych) [4]. W obliczeniach uwzględniono najbardziej i najmniej korzystną dla przepływu wody konstrukcją wlotową przepustu.

W każdym przypadku przyjęto, że wylot przepustu jest niezatopiony. Najwyższy poziom wody na wlocie przyjęto według warunku zatopienia wlotu przepustu zapisanego w rozporządzeniu [4]: $H = 1,2h$ ograniczając się do obliczeń w warunkach niezatopionego wlotu. Dla każdego z analizowanych przekrojów, korzystając z formuły Manninga (1), obliczono przepustowość przewodu przepustu. Następnie wyznaczono przepustowość przepustu według Bodhaine'a [1] – formuły (4 i 9) oraz według warunków technicznych (10) zawartych w załączniku do rozporządzenia [4].

Przepustowości przepustu według Bodhaine'a [1] i rozporządzenia [4] nie są zależne od spadku przewodu przepustu (rys. 5 i 6). Formuła (10) zawarta w warunkach technicznych uwzględnia jedynie wpływ konstrukcji wlotowej. Według Bodhaine'a formuły (4 i 9) rozróżniają warunki ruchu rwącego i spokojnego. Kiedy w przewodzie przepustu panują warunki ruchu rwącego, o wydatku przepustu decyduje tylko konstrukcja wlotowa. W przypadku spokojnego ruchu wody, gdy w przewodzie woda płynie z głębokością normalną, straty energii na długości przepustu H_L równe są wysokości położenia części wylotowej przepustu względem jego części wlotowej – z . Zatem wydatek przepustu jest taki sam jak dla ruchu rwącego.

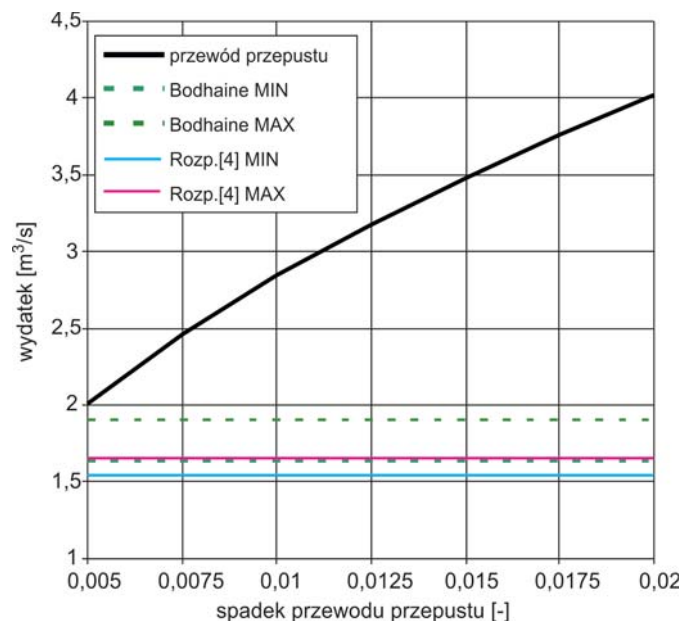
Obliczona przepustowość przewodu odpowiada maksymalnej głębokości normalnej równej 0,75 m, przyjętej na podstawie § 45 rozporządzenia [4]. Przepustowość ta rośnie wraz ze wzrostem spadku przewodu. Istotne jest, że dla minimalnych spadków przewodu betonowego jest ona mniejsza od przepustowości przepustu pracującego w warunkach niezatopionego wlotu (rys. 6). Ruch spokojny w przewodzie przepustu występuje w przybliżeniu dla spadków mniejszych od 1%.



Rys. 5. Przepustowość przepustu o przekroju kwadratowym $1 \times 1m$, współczynnik szorstkości $n = 0,015m^{-1/3}s$

Można zatem przyjąć, że dla przykładowego obiektu o przekroju prostokątnym, wykonanego z materiałów betonowych przy spadkach przewodu przepustu mniejszych od 1% o przepustowości decydują parametry przewodu. Najwyższy możliwy poziom wody przed przepustem odpowiadający warunkom niezatopionego wlotu spowoduje w przewodzie przepustu wystąpienie głębokości normalnej wody powyżej dopuszczalnej dla przepustów pracujących niepełnym przekrojem przewodu. Dla spadków przewodu większych od 1%

w zdecydowanej większości przypadków o przepustowości obiektu decydować będzie konstrukcja wlotowa. Przy większych głębokościach wody na wlocie pracującym jako niezatopiony, nie osiągnie się dopuszczalnej głębokości normalnej wody w przewodzie. Głębokość ta zostanie osiągnięta tylko w warunkach zatopionego wlotu przepustu.



Rys. 6. Przepustowość przepustu o przekroju kołowym $d = 1m$, współczynnik szorstkości $n = 0,01m^{-1/3}s$

Analizując przepływ wody w gładkim przepuszczeniu kołowym (rys. 6), tylko dla najmniejszego dopuszczonego wytycznymi spadku przewodu przepustu (0,5%), przepustowość przewodu zbliżona jest do przepustowości całego obiektu. Podkreślić należy, że w każdym przypadku w przewodzie przepustu występuje ruch rwący. Przy spadku $i_0 = 0,5\%$ liczba Froude'a wynosi 1,18, zaś przy spadku przewodu 2% $Fr = 2,38$. Dlatego też w przepustach zbudowanych z materiałów o mniejszej szorstkości, praktycznie w każdym przypadku o przepustowości decyduje wlot przepustu. Przy spadku przewodu przepustu równym 2% przepustowość przewodu przepustu jest dwukrotnie większa od przepustowości całego przepustu pracującego w warunkach niezatopionego wlotu. Dopuszczalna głębokość normalna w przewodzie przepustu może zostać osiągnięta tylko w warunkach pracy przepustu z zatopionym wlotem, przy czym w większości przypadków rzędna wody na wlocie przepustu będzie większa od rzędnej nawierzchni drogi. W takiej sytuacji woda przelewać się może przez nawierzchnię drogi.

Podsumowanie

Ze względu na możliwość pojawienia się różnych przedmiotów mogących zablokować przepust, obiekty te projektuje się najczęściej tak, aby jego wlot nie uległ zatopieniu. Kiedy wylot przepustu pracować będzie również jako niezatopiony, w jego przewodzie panować będą warunki bezciśnieniowe. Niestety, w praktyce projektowej zdarza się, że