

dr inż. Witold Niedzielski

Instytut Inżynierii Środowiska
Politechniki Poznańskiej

CHARAKTER PRZEPŁYWU W SIECI KANALIZACJI DESZCZOWEJ

Przewody sieci kanalizacyjnych wymiaruje się przy założeniu, że przepływy w nich występujące są ustalone [1]. W konsekwencji tego założenia przyjmuje się spadek hydrauliczny równy spadkowi dna, a wypełnienie niezmienną w czasie i na długości przewodu. Wypełnienie obliczeniowe ze względów eksploatacyjnych powinno być większe lub równe połowie wysokości przewodu. Przy tych założeniach w większości przypadków przepływy mają charakter spokojny. W rzeczywistości przepływy w sieci są nieustalone, ponieważ dopływy do sieci zależą od:

- nierównomierności zrzutów ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych oraz
- zmiennego natężenia deszczu w czasie jego trwania.

Nierównomierność zrzutów ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych wywołuje z reguły niewielkie wahania przepływu w sieci. Natomiast spływ ścieków deszczowych powoduje duże zmiany parametrów hydraulicznych. Stąd w przewodach sieci kanalizacji deszczowej w czasie trwania spływu ścieków deszczowych mogą wystąpić przepływy o różnym charakterze tzn. przepływy spokojne i rwące.

Analiza jakościowa zjawisk przepływowych w przewodach sieci kanalizacji deszczowej

Przewody sieci kanalizacji deszczowej obliczane są na przepływ, spowodowany deszczem o określonym czasie trwania i powtarzalności. Zakłada się przy tym, że deszcz obliczeniowy ma niezmienną natężenie, a wypełnienie przewodów jest bliskie całkowitemu [1]. W praktyce obraz przepływów w przewodach sieci kanalizacji deszczowej jest różny od zakładanego. Z uwagi na zmienne w czasie natężenie deszczu oraz opóźnienie dopływu do przewodu spowodowane spływem powierzchniowym, przepływ w przewodzie zmienia się od zerowego do miarodajnego i następnie zanika. Towarzyszą temu zmiany wypełnienia i prędkości przepływu. Drugą przyczyną zmian wypełnienia i prędkości mogą być zjawiska cofkowe w wyniku zamierzonego lub niezamierzonego wzrostu wypełnienia w dolnym węźle rozpatrywanego przewodu. W zależności od tych przyczyn, w czasie trwania spływu ścieków deszczowych, w przewodach sieci kanalizacji deszczowej mogą wystąpić cztery fazy przepływu:

faza napełniania, gdy wzrost wypełnienia postępuje zgodnie z kierunkiem przepływu,
faza obniżania, gdy wypełnienie maleje zgodnie z kierunkiem przepływu,

faza piętrzenia, gdy wypełnienie rośnie w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu,

faza opróżniania, gdy wypełnienie maleje w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu.

Faza napełniania występuje od chwili rozpoczęcia deszczu do wypełnienia się przewodu. Faza obniżania rozpoczyna się, gdy dopływ do przewodów zaczyna maleć i trwa do ustabilizowania się przepływu lub jego zaniku. Fazy piętrzenia i opróżniania występują w przypadku podtapiania przewodu. Faza piętrzenia jest zjawiskiem charakterystycznym dla cofki, natomiast faza opróżniania występuje, gdy w dolnym węźle przewodu zostanie usunięta przyczyna powodująca piętrzenie.

W czasie piętrzenia i obniżania spadek zwierciadła ścieków jest mniejszy od spadku dna. Stąd należy sądzić, że prędkości przepływu będą mniejsze w porównaniu z prędkościami dla przepływu ustalonego. Natomiast w czasie fazy napełniania i opróżniania spadki zwierciadła ścieków są większe od spadku dna przewodu. Zatem w tych przypadkach, w zależności od spadku przewodu i stopnia wypełnienia (y/D), mogą wystąpić różne charaktery przepływu.

Analiza parametrów hydraulicznych w przewodzie kołowym o przepływie ze zwierciadłem swobodnym

Przepływy ze swobodnym zwierciadłem mogą mieć charakter spokojny, krytyczny i rwący [3]. Kryterium pozwalające na określenie warunków przepływu, zwane kryterium Frouda, jest powszechnie znane. Dla dowolnego kształtu przekroju można zapisać, że:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{B}}} \quad (1)$$

gdzie:

- Fr — liczba Frouda
- v — średnia prędkość przepływu [m/s]
- A — pole przekroju czynnego [m²]
- B — szerokość zwierciadła ścieków [m]
- g — przyspieszenie ziemskie [m/s²].

W zależności od wartości liczby Frouda przepływ ma charakter spokojny dla $Fr < 1$, krytyczny dla $Fr = 1$ i rwący dla $Fr > 1$.

W przepływach ustalonych ze swobodnym zwierciadłem, o średniej prędkości przepływu decyduje nachylenie dna przewodu (zakłada się równość spadku hydraulicznego i dna prze-

wodu). Stąd podstawiając do wzoru Chézy-Maninga warunek na przepływ krytyczny (1), po przekształceniach spadek krytyczny [3] przyjmuje postać:

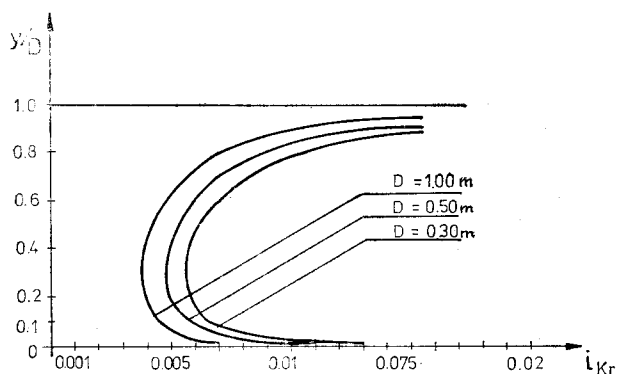
$$i_{kr} = \frac{g \cdot \kappa \cdot n^2}{\alpha \cdot B \cdot Rh^{1/3}} \quad (2)$$

gdzie:

- i_{kr} — spadek krytyczny
- κ — długość obwodu zwilżonego [m]
- Rh — promień hydrauliczny [m]
- g, B — jak we wzorze (1)
- α — współczynnik Coriolisa
- n — współczynnik szorstkości.

Spadek krytyczny dla rozpatrywanego przewodu jest funkcją wymiarów geometrycznych tego przewodu i wypełnienia. Wypełnienie i długość obwodu zwilżonego monotonicznie rosną, natomiast szerokość zwierciadła i promień hydrauliczny posiadają ekstremum. Dla przewodu kołowego szerokość zwierciadła wody rośnie od zera, w połowie wysokości wypełnienia osiąga maksimum i następnie maleje do zera. Natomiast wartość promienia hydraulicznego rośnie od zera, maksimum osiąga przy wypełnieniu równym 85,3% i dalej maleje do wartości, jak przy połowie wysokości przewodu. Stąd wynika, że spadek krytyczny musi posiadać ekstremum.

Przebiegi zmian spadku krytycznego dla wybranych średnic przewodu, w zależności od stopnia wypełnienia, przedstawiają krzywe na rys. 1.



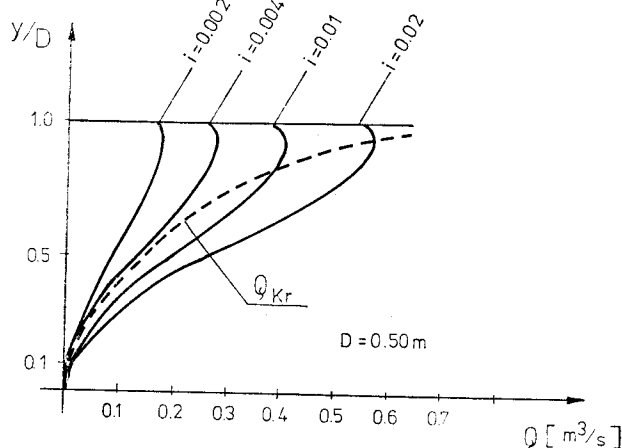
Rys. 1 Zależność spadku krytycznego od wypełnienia dla wybranych średnic kanałów

Wartości spadku krytycznego dla wypełnienia zerowego i całkowitego dążą do nieskończoności. Minimalną wartość spadek krytyczny osiąga dla stopnia wypełnienia równego 29,7%. Spadek krytyczny przy tym stopniu wypełnienia nazywany jest spadkiem granicznym [4].

Podstawiając za $n=0,013$ i $\alpha=1,0$, spadek graniczny opisuje wzór:

$$i_g = \frac{3,778 \cdot 10^{-3}}{D^{1/3}} \quad (3)$$

Wartość spadku granicznego podano w tab. 1. Przepływy ustalone przy spadkach przewodów mniejszych od granicznego są zawsze spokojne. Obrazuje to przykładowy wykres na rys. 2, wykonany dla przewodu o średnicy 0,5 m.



Rys. 2 Zależność natężenia przepływu od wypełnienia kanału dla spadków charakterystycznych

Na wykresie tym pokazano zmiany natężenia przepływu w funkcji stopnia wypełnienia dla spadków: minimalnego określonego z zależności $i_{min}=1/D$ [7], granicznego (3) oraz spadków 0,01 i 0,02. Linia przerywana została zaznaczony przepływ krytyczny. Z wykresu wynika, że po przekroczeniu spadku granicznego, krzywe zmian natężenia przepływu przecinają się z krzywą przepływu krytycznego. Napełnienia przewodu przy przepływach krytycznych noszą nazwę napełnień przejściowych [4]. Przepływy między napełnieniami przejściowymi są przepływami rwącymi.

Szczegółową analizę warunków przepływu dla ruchu ustalonego, w zależności od spadku i stopnia wypełnienia przewodu, przeprowadził Dołęga [4]. W konsekwencji doszedł do następujących wniosków:

- Charakter przepływu w przewodzie zależy od spadku dna i od napełnienia.
- Szczególne znaczenie dla określenia charakteru przepływu posiada spadek graniczny i_g .
- Jeżeli w przewodach sieci przepływy są ustalone, to dla spadków dna mniejszych od spadku granicznego występują wyłącznie przepływy spokojne; dla spadku dna rów-

WARTOŚCI SPADKÓW GRANICZNYCH

Tabela 1

D, m	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10
$i_g, ‰$	6,46	6,00	5,64	5,13	4,76	4,48	4,25	4,07	3,91	3,78	3,66
D, m	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,50	3,00
$i_g, ‰$	3,56	3,46	3,38	3,30	3,23	3,17	3,14	3,05	3,00	2,78	2,62

nego spadkowi granicznemu przepływy są spokojne z wyjątkiem napełnienia przejściowego równego 29,7%, przy którym przepływ jest krytyczny; dla spadków dna większych od spadku granicznego, pomiędzy napełnieniami przejściowymi przepływy są rwące, dla napełnień przejściowych krytyczne, a w pozostałym zakresie napełnień spokojne.

— Niezależnie od spadku dna przewodu istnieje zawsze takie napełnienie, powyżej którego przepływ jest spokojny.

Przedstawione wnioski są w pełni słuszne wyłącznie dla przepływów ustalonych. W przypadku przepływów ustalonych wolnozmiennych, niezależnie od spadku dna przewodu, możliwe są wszystkie rodzaje charakterów przepływów, tj. spokojne, krytyczne i rwące [2, 4, 5, 6].

Zmiany charakteru przepływu, przy założeniu przepływów ustalonych wolnozmiennych, występują w określonych przekrojach przewodów, stąd są odcinki sieci, w których przepływy mają charakter rwący. Uwzględniając, że przepływy w sieci są niestalone, charakter przepływów ulega ciągłym zmianom w czasie i na długości przewodów. Ocena warunków występowania i czasu trwania przepływów o różnym charakterze jest możliwa w oparciu o matematyczny model przepływów niestalonych.

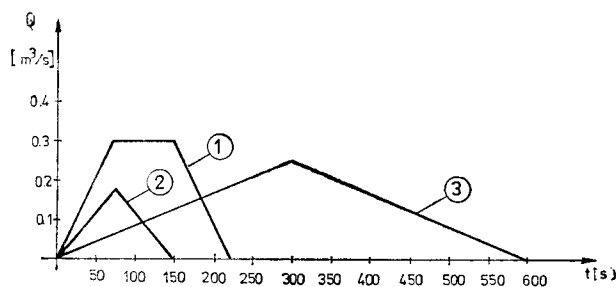
Model matematyczny przepływów niestalonych

Podstawowe równania opisujące przepływy niestalone zostały wyprowadzone przez Saint Venanta pod koniec XIX wieku [10]. Równania Saint Venanta nie posiadają analitycznego rozwiązania, natomiast rozwiązywanie numeryczne jest pracochłonne. Stąd dopiero elektroniczna technika obliczeniowa pozwoliła na wykorzystanie tych równań w praktyce. W literaturze spotykanych jest wiele sposobów numerycznego rozwiązania równań Saint Venanta [8, 11]. Dla analizy warunków przepływów w sieci kanalizacyjnej najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie metody charakterystyk [8]. Posiada ona tę zaletę, że uwzględnia możliwość obliczania parametrów hydraulicznych przy zmianie warunków przepływów, tzn. przechodzenia przepływów spokojnych w rwące i odwrotnie. Za pomocą modelu matematycznego przepływów niestalonych obliczane są parametry przepływu w wybranych przekrojach przewodu i w różnych chwilach. Obliczone parametry przepływu w czasie i na długości przewodu pozwalają na formułowanie wniosków dotyczących np. zmian wypełnienia, natężenia przepływu, charakteru przepływu.

Przykłady obliczeniowe

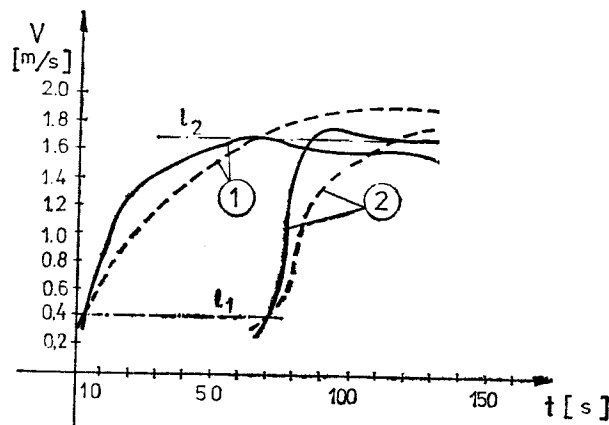
W celu zilustrowania zmian charakteru przepływu zostały przeprowadzone przykładowe obliczenia na bazie modelu matematycznego

przepływów niestalonych [9]. Obliczenia wykonano dla przewodu o średnicy 0,5 m, długości 100,00 m, dla dwóch spadków dna $i_{\min} = 0,002$ oraz $i_g = 0,00476$. Natężenie dopływu do węzła górnego dla spadku $i_g = 0,00476$ zmieniało się zgodnie z hydrogramami (1) i (2) — rys. 3, a dla spadku $i_{\min} = 0,002$ zgodnie z hydrogramem (3) — rys. 3. Wpływ z przewodu został przyjęty bez tłumienia.



Rys. 3 Hydrogramy dopływu ścieków deszczowych do górnego węzła odcinka

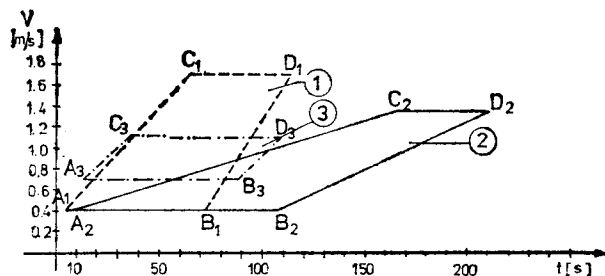
Wyniki obliczeń opracowano w formie wykresów. Rys. 4 przedstawia przebieg zmian prędkości średniej (linie ciągłe) i prędkości krytycznej (linie przerywane), dla fazy napełniania w przekrojach na 10,00 m — krzywe (1) i 90,00 m — krzywe (2), w funkcji czasu.



Rys. 4 Zależność prędkości średniej i krytycznej od czasu dla fazy napełniania

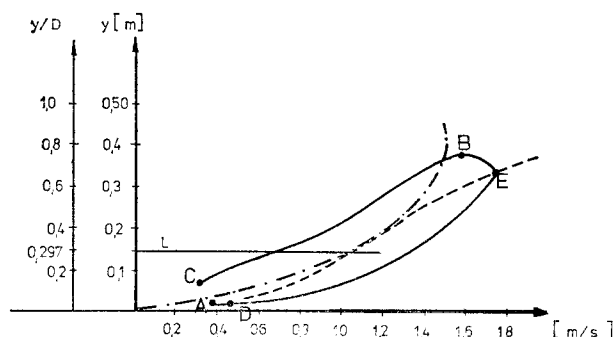
Wykres został wykonany dla spadku dna 0,00476 i hydrogramu (1). Liniami osiowymi l_1 , l_2 zaznaczono zmiany charakteru przepływu. Między tymi liniami przepływ ma charakter rwący. Rys. 5 przedstawia obszary przepływów o charakterze rwącym:

- obszar (1) dla $i = 0,00476$, hydrogramu (1)
- obszar (2) dla $i = 0,00476$, hydrogramu (2)
- obszar (3) dla $i = 0,002$, hydrogramu (3)



Rys. 5 Obszary przepływów rwących

Punkty A_i oznaczają przejście przepływu spokojnego w rwący na początku przewodu, punkty B_i — na końcu przewodu. Punkty C_i i D_i oznaczają odpowiednio przejście przepływu rwącego w spokojny na początku i na końcu przewodu. Na rys. 6 został pokazany przebieg zmian wypełnienia przewodu w funkcji średniej prędkości przepływu w przekroju na 10,00 m dla $i=0,00476$ i hydrogramu (1).



Rys. 6 Zależność wypełnienia kanału od średniej prędkości przepływu. A—B — faza napełniania, B—C — faza obniżania.

Linia przerywana — prędkość krytyczna, linia osiowa — prędkość dla przepływu ustalonego

Wnioski

1. Podczas nieustalonych przepływów, w przewodzie ułożonym ze spadkiem minimalnym, mogą wystąpić przepływy o charakterze rwącym (obszar (3) na rys. 5).
2. Czas trwania przepływu o charakterze rwącym jest stosunkowo krótki i zależy od hydrogramu dopływu oraz czasu trwania fazy napełnienia (rys. 4, 5).
3. Prędkość przepływu przy tych samych napełnieniach jest różna dla fazy napełniania i fazy obniżania (rys. 6). Dla fazy napełniania prędkości przepływów są większe od prędkości dla fazy obniżania. W fazie napełniania prędkości przepływów są większe od prędkości dla przepływów ustalonych. Oznacza to, że spadek hydrauliczny jest większy od spadku dna przewodu. W fazie obniżania prędkości przepływów są mniejsze od prędkości dla przepływu ustalonego, tzn. że spadek hydrauliczny jest mniejszy od spadku dna przewodu.

4. W przedziale napełnień między punktami D i E prędkości przepływów są większe od prędkości krytycznych (rys. 6). Zatem w tym przedziale istnieje przepływ o charakterze rwącym.

5. Przy przejściu przepływów o charakterze rwącym w spokojne nie pojawia się odskok hydrauliczny, ponieważ przepływy spokojne zastępują rwące w wyniku zmiany natężenia przepływu, a nie po spełnieniu równania odskoku [3]. Stąd przepływowi rwącym przy przejściu w spokojne nie towarzyszą zjawiska typowe dla odskoku hydraulicznego.

LITERATURA

1. W. BŁASZCZYK, P. BŁASZCZK, H. STAMATELLO: *Kanalizacja*, T. I. Warszawa Arkady, 1983.
2. V. T. CHOW: *Open channel hydraulics*. Tokyo, New York, London, Mc Graw-Hill Book Company, 1959.
3. E. CZETWERTYŃSKI: *Hydraulika i hydromechanika*. Warszawa PWN, 1958.
4. J. DOŁĘGA: *Projektowanie kanałów o przekroju kołowym na podstawie teorii ruchu wolnozmiennego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Nr 103, Budownictwo XXIII, 1965.
5. C. GRABARCZYK, M. SOWIŃSKI: *Analiza hydraulicznych warunków wolnozmiennych przepływów w kołowych przewodach kanalizacyjnych*. Materiały Konferencji pt.: Postęp Techniczny w Kanalizacji, Wrocław 1975.
6. C. GRABARCZYK, M. SOWIŃSKI: *Metody obliczania przepływów wolnozmiennych w kołowych przewodach kanalizacyjnych*. Materiały Konferencji pt.: Postęp Techniczny w Kanalizacji, Wrocław 1975.
7. S. V. JAKOVLEV, V. I. KALICYN: *Samoočišćenie kanalizacionnoi seti, Vodosnabżenie i Sanitarnaja Technika*. No. 7, 1970.
8. J. A. LIGGETT, D. A. WOOLHISER: *Difference Solutions of the Shallow Water Equation*, J. Eng. Mech. Div, ASCE, Vol. 93, No. EM2, April 1967.
9. W. NIEDZIELSKI: *Obliczanie nieustalonych przepływów cieczy w przewodzie kanalizacyjnym z uwzględnieniem przejścia z przepływu ze swobodnym zwierciadłem w ciśnieniowy i odwrotnie*. Rozprawa doktorska, Poznań 1982.
10. V. L. STREETER, E. B. WYLIE: *Fluid Mechanics*, New York. Mc Graw-Hill Book Company, 1975.
11. V. L. STREETER, E. B. WYLIE: *Hydraulic transients*. New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1967.