

Jadwiga KRÓLIKOWSKA<sup>1</sup>, Andrzej KRÓLIKOWSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska  
Politechnika Krakowska

<sup>2</sup>Institut Inżynierii Środowiska  
Podhalańska Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, Nowy Targ

## WYBRANE PROBLEMY NIEZAWODNOŚCI DZIAŁANIA I BEZPIECZEŃSTWA SYSTEMÓW KANALIZACYJNYCH

### SOME PROBLEM OF RELIABILITY AND SAFETY OF SEWERAGE

*The article presents the main features of the sewerage systems as complex objects (with a tree structure) working in variable and often difficult to predict conditions. It describes main malfunctions, failures and mathematical model of reliability of sewerage systems.*

## 1. Wprowadzenie

Systemy kanalizacyjne należą do strategicznej infrastruktury technicznej terenu, odgrywającej zasadniczą rolę w kształtowaniu zrównoważonego rozwoju jednostki osadniczej, a stawiane im wymagania mogą być złagodzone tylko w warunkach wyjątkowych (np. ekstremalnych warunkach meteorologicznych). Nie ulega wątpliwości, że systemy kanalizacyjne grawitacyjne, a tych w warunkach polskich jest przeważająca większość, stanowią potencjalne źródło zagrożenia dla środowiska. Uwzględniając powyższe systemy kanalizacyjne powinna cechować wysoka niezawodność zarówno funkcjonowania jak i bezpieczeństwa.

Sieć kanalizacyjną, stanowiącą zasadniczy element systemu kanalizacyjnego należy rozpatrywać jako obiekt, który w procesie eksploatacji znajduje się pod działaniem dwóch strumieni zdarzeń: uszkodzeń i odnow. Z niezawodnościowego punktu widzenia sieć kanalizacyjna ma bardzo złożoną strukturę typu „drzewo” czyli strukturę hierarchiczną, a jej cechą charakterystyczną jest występowanie wielu stanów podsystemu, będących rezultatem kombinacji elementów uszkodzonych i nieuszkodzonych. Z hierarchiczności sieci wynika, że wszystkie ścieki z miejsca ich powstawania są dostarczane do oczyszczalni ścieków po jedynej możliwej, drodze poprzez ściśle określoną kolejność odcinków (kanałów bocznych i kolektorów). Czyli jest ukierunkowany acykliczny graf.

Problemy niezawodności sieci kanalizacyjnej ostatnio nabierają coraz większego znaczenia. Z jednej strony jest to związane ze wzrastającym antropogennym oddziaływaniem na otaczające środowisko, z drugiej strony z rozwojem jednostek osadniczych.

Nie można osiągnąć absolutnie niezawodnego funkcjonowania sieci kanalizacyjnej, dlatego, że będąc strukturą złożoną i terytorialnie rozproszonym systemem, w procesie eksploatacji znajduje się pod działaniem wielu niekorzystnych czynników, których

przytłaczająca większość ma charakter przypadkowy, praktycznie niemożliwy do kontroli. Tym niemniej podjęcie się określonych organizacyjno-technicznych przedsięwzięć odnośnie czynnych sieci kanalizacyjnych może wyraźnie zwiększyć ich niezawodność. Matematyczne modelowanie procesów określających niezawodność sieci kanalizacyjnych może wykryć ewentualny charakter takich przedsięwzięć, a także uzasadnić ich ekonomiczną efektywność. To z kolei wymaga badań eksploatacyjnych, prowadzonych w naturalnych warunkach funkcjonowania sieci kanalizacyjnej, które identyfikują rodzaje uszkodzeń jak również ich przyczyny i skutki, a nadrzędnym ich celem jest określenie wartości wskaźników niezawodności.

## 2. Charakterystyka niesprawności sieci kanalizacyjnej

Przez niesprawność sieci kanalizacyjnej należałoby rozumieć stan, którego konsekwencją jest niespełnianie stawianych sieci wymagań i pojawienie się związanych z tym skutków [1, 4]. Niesprawność w pracy sieci kanalizacyjnej może być wywołana poprzez zanieczyszczenie lub uszkodzenie (awarie).

Zanieczyszczenie kanału tj. zamulenie kanału lub jego zatkanie w efekcie prowadzą do utraty drożności sieci kanalizacyjnej; jest to największy i najczęstszy problem eksploatacyjny kanalizacji grawitacyjnej. Zjawisko zamulania i odkładania się osadów w kanałach dotyczy odcinków, w których prędkość przepływu ścieków jest niewystarczająca do transportu zawartych w nich zawieszin (nie jest samooczyszczająca). Zawieszina osadzająca się w kanałach zwiększa opory przepływu powodując zanieczyszczenie kanałów. W tych warunkach zmniejszenie prędkości przepływu może dochodzić nawet do 70% normalnej prędkości w kanałach. Zanieczyszczenie kanałów może również powodować niejednorodny ich spadek oraz specyficzny skład ścieków (np. ścieki z mleczarni zawierają dużo tłuszczów).

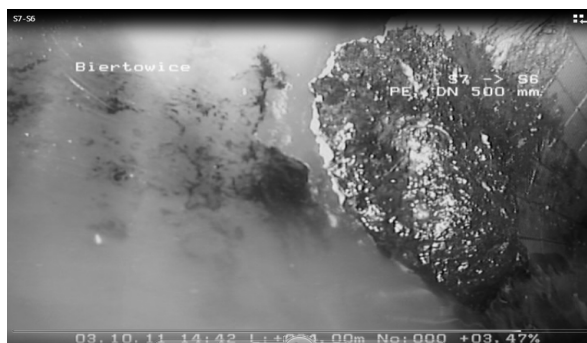


Rys. 1. Osad przyczepiony do ścian kanału, tłuszcze, redukcja średnicy o ok. 5%

Fig. 1. Sewage sludge on internal wall channel, fats, channel capacity reduction about 5 percent

Najczęstszą przyczyną powstawania zatorów w przewodach kanalizacyjnych (zatkanie) są błędy w eksploatacji i niedbałość o kanalizację. Dziś sieci kanalizacyjne wykonuje się najczęściej z tworzywa sztucznego, które ma wiele zalet (między innymi

bardzo gładkie powierzchnie rur, odporne na powstawanie kamienia i agresywne substancje chemiczne). Jednak nawet najlepiej wykonana sieć będzie się zatykać, jeśli nie będzie się z niej właściwie korzystać. Czasami użytkownicy traktują sieć kanalizacyjną jak składowisko odpadów, do którego można wrzucić dosłownie wszystko (odpady stałe i ciężkie – przemysłowe, resztki jedzenia, fragmenty odzieży czy stare meble).



Rys.2. Twardy lub zbity osad, beton na dnie kanału, redukcja średnicy ok. 20%

Fig. 2. Solid or massive sewage sludge, concreto on channel bottom, channel capacity reduction about 20 percent.

Przyczyną zatorów są przerosty korzeni, zjawisko wcale nie rzadkie. Ścieki ze względu na wyższą temperaturę i dużą zawartość związków mineralnych stanowią doskonałą pożywkę dla korzeni drzew i dlatego po przedostaniu się do wnętrza kanału korzenie rozrastają się, a z czasem zarastają cały przekrój poprzeczny kanału i wstrzymują przepływ.



Rys.3. Zator spowodowany przez korzenie z pobliskich drzew, zmniejszenie średnicy przewodu o 98 %

Fig. 3 Blockage due to tree roots, channel capacity reduction about 98 percent.

Bieżąca eksploatacja wymaga systematycznego usuwania wszelkiego typu zanieczyszczeń i udroźniania kanału.

W ostatnich latach narasta problem odorów powstających w trakcie transportu ścieków ze zbyt małą prędkością. Związki organiczne znajdujące się w ściekach i złogach

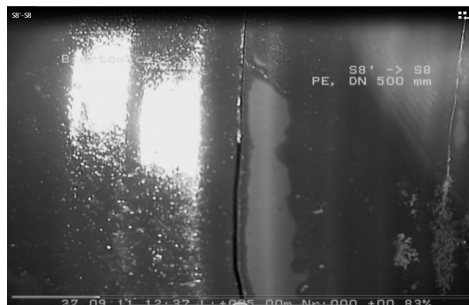
osadów ulegają rozkładowi w warunkach beztlenowych, któremu towarzyszy powstawanie siarkowodoru. Ważnym czynnikiem, sprzyjającym tworzeniu się siarczków i siarkowodoru, jest temperatura, dlatego w okresie letnim problem ten się nasila. Pochodzące z kanalizacji odory nie są jedynie uciążliwością. Mogą być także substancją niebezpieczną dla zdrowia i życia pracowników obsługujących sieć kanalizacyjną, siarkowodor pod względem toksyczności jest porównywalny z cyjanowodorem (HCN), tzw. kwasem pruskim (groźniejszym od tlenku węgla). Ponadto zawsze stanowią zagrożenie dla betonu i elementów metalowych, z których zbudowana jest sieć, poprzez powodowanie korozji siarczanowej.

Sprawa dodatkowo się komplikuje w systemach kanalizacji ciśnieniowej; skala problemu zwiększa się wraz ze wzrostem długości rurociągu tłocznego, a w efekcie – czasu przebywania w nim ścieku, zwiększeniem się CHZT ścieków, podwyższonym stężeniem jonów siarki, np. pochodzenia przemysłowego, oraz umieszczeniem studni rozprężnych w bezpośrednim sąsiedztwie siedlisk ludzkich.

Związki siarkowodoru mogą pojawić się w kanalizacji również w wyniku reakcji związków zawartych w ściekach bytowo-gospodarczych ze związkami zawartymi w ściekach przemysłowych np. garbarskich, nielegalnie zrzucanych do kanalizacji ściekowej.

Najczęstszym uszkodzeniem (awarią) w obrębie sieci kanalizacji grawitacyjnej jest nieszczelność kanału i występowanie infiltracji wód gruntowych wraz z cząstkami gruntu. Powstają wówczas pustki powietrzne mogące powodować zapadanie się gruntu bezpośrednio nad kanałem. Infiltracja wód gruntowych wraz z cząsteczkami gruntu przedostającego się do kanalizacji może doprowadzić nawet do katastrofy kanalizacyjnej. O skali tego zjawiska decydują rozmiary nieszczelnych miejsc, rodzaj gruntu, krzywa jego uziarnienia i stopień zagęszczenia gruntu w strefie ułożenia kanału. Przy występowaniu tego problemu drobniejsze cząstki gruntu są wypłukiwane tak długo, dopóki nad miejscem nieszczelności nie utworzy się filtr z pozostałych cząstek gruntu. W przypadku wystąpienia cofki w kanale lub podczas pracy kanału pod ciśnieniem filtr zostaje uszkodzony. Proces ten prowadzi z czasem do zapadania się gruntu znajdującego się bezpośrednio nad kanałem. W rezultacie dochodzi do osiadania powierzchni terenu i nawierzchni oraz fundamentów obiektów zlokalizowanych bezpośrednio nad kanałem. W przypadku występowania sztywnych nawierzchni (np. drogowych) w gruntach niespoistych dochodzi do tworzenia się lokalnych pustek bezpośrednio pod powierzchnią uliczną. Kiedy pustki te osiągną duże rozmiary, występuje wówczas osiadanie lub pękanie gruntu, a następnie zapadanie się powierzchni ulicznych.

Nieszczelności powstają w miejscu pęknięcia, deformacji, zawału, przemieszczenia się rur na połączeniach, ubytku fragmentów konstrukcji kanału, przyłącza z kolektora kanalizacyjnego do przykanalika i mogą być spowodowane szeregiem przyczyn, m.in. wadliwym lub nieszczelnym wykonaniem, osiadaniem gruntu, zbyt dużymi obciążeniami zewnętrznymi, wewnętrznymi, nieostrożnie prowadzonymi pracami budowlanymi czy też przywołanymi już tu korzeniami drzew.



Rys.4 Pęknięcie obwodowe

Fig. 3. Circumferential channel crackage.

Błędne wykonanie lub wykonanie bez uszczelnienia podłączenia przykanalika szczególnie dotyczy tzw. nielegalnych połączeń odprowadzenia wód deszczowych z prywatnej posesji do kanalizacji ściekowej, przybierające w ostatnich latach znacznych rozmiarów.

Do uszkodzeń, których występowanie powoduje zmniejszenie nośności konstrukcji kanału należy zaliczyć korozję wewnętrzną, ścieranie dna i boków konstrukcji, zapadnięcia kanałów oraz zarysowania i drobne pęknięcia.

### 3. Założenia do oceny niezawodności sieci kanalizacyjnej

Do oceny niezawodności obiektów o złożonej strukturze, a takimi są właśnie systemy kanalizacyjne, nie wystarczy wykorzystanie podstawowych twierdzeń i zasad rachunku prawdopodobieństwa. Złożony system może spełniać swoje zadanie, nawet jeśli jego niektóre elementy nie zadziałały. Konieczne jest w takim przypadku zastosowanie odpowiedniej metody, opracowanej specjalnie do oceny niezawodności takich systemów. Matematyczny model funkcjonowania złożonego technicznego systemu zachodzi w obszarze, którego każdy punkt przedstawia jeden z możliwych stanów obiektu [1, 2, 3, 5]. W procesie pracy system przechodzi z jednego stanu w drugi, tworząc trajektorię ruchu w obszarze stanów, charakteryzowanych zbiorem parametrów niezawodności funkcjonowania  $Z$ , graficznie przedstawioną za pomocą grafu. Wierzchołki grafu (ponumerowane) odpowiadają możliwym stanom systemu, a strzałki wskazują na jego przejście z jednego stanu w drugi. Przejścia między stanami niezawodnościowymi odpowiadają zdarzeniom typu uszkodzenie, naprawa, profilaktyka, kontrola itp., stąd każda strzałka opisana jest intensywnością strumienia niesprawności  $\lambda_i$  lub odnowy  $\mu_i$ .

Jako punkt wyjścia w rozważaniach niezawodności funkcjonowania systemu kanalizacyjnego należy zdefiniować, kiedy stan systemu uważany jest za sprawny, czyli spełnia tzw. kryterium sprawności. Sieć kanalizacyjna posiada zdolność przepustową, której wielkość określa się zarówno zdolnością przepustową poszczególnych elementów (kanałów, urządzeń) jak i właściwościami konfiguracji sieci. W rezultacie awarii które-

gość elementu, jego zdolność przepustowa zmniejsza się (być może do zera – przy pełnym zaprzestaniu działania urządzenia), co prowadzi do zmniejszania się zdolności przepustowej sieci w całości. Jeśli przy tym okaże się, że rezerwy zdolności przepustowej systemu są wyczerpane, to nastąpi zrzut nieoczyszczonych ścieków przez awaryjne spusty ścieków lub ich wylewanie na powierzchnię, tj. system traci zdolność wypełniania swoich funkcji i pociąga za sobą pewne straty, np. straty materialne wywołane zalewaniem i zanieczyszczeniem środowiska gruntowo-wodnego, straty społeczne poprzez niezadowolenie mieszkańców. Za parametr poziomu jakości funkcjonowania w odniesieniu do systemów kanalizacyjnych (stanu systemu), można przyjąć więc procent odprowadzanych ścieków z obszaru obsługiwanego przez system. Stan systemu charakteryzujący się spełnieniem funkcji w 100% oznacza odprowadzenie nominalnej ilości ścieków z obszaru objętego kanalizacją ( $Z_o$ ). Przy częściowej sprawności ustala się tzw. dopuszczalny spadek wydajności (przepustowości) systemu ( $Z_{min}$ ). Jest to pewien procent nieodprowadzonych ścieków, przy którym nie pojawiają się znaczące straty dla użytkowników systemu, otoczenia oraz otaczającego środowiska. Przy powstaniu uszkodzenia system spełnia swoje funkcje mniej niż w 100%, ale przy zmniejszeniu poziomu jakości funkcjonowania do wartości granicznej. Innym parametrem opisującym niezawodność funkcjonowania i odniesionym do kryterium sprawności może być np. intensywność uszkodzeń, zdefiniowana jako wartość graniczna.

Cały zbiór stanów sieci kanalizacyjnej może więc zawierać trzy podzbiory: A, B i C. Jeżeli parametr poziomu jakości funkcjonowania stanu systemu  $Z \geq Z_o$ , to stan taki należy do podzbioru A, do którego wchodzi wszystkie stany o normalnym poziomie funkcjonowania. Jeżeli parametr poziomu jakości funkcjonowania stanu systemu zawiera się w przedziale  $Z_o > Z \geq Z_{min}$ , to stan taki należy do podzbioru B, do którego wchodzi wszystkie stany zdolne do pracy z nieco zmniejszonym (w porównaniu z normalnym) poziomem jakości funkcjonowania. Pozostałe stany tworzą podzbiór C, w których system jest niezdolny do pracy przy uszkodzeniu.

W procesie eksploatacji trajektoria zmiany stanu sieci kanalizacyjnej może przechodzić przez którykolwiek ze zbiorów. Przyjmując czas znajdowania się sieci kanalizacyjnej w podzbiorze A jako  $T_A$ , w podzbiorze B jako  $T_B$ , a w podzbiorze C jako  $T_C$  oraz punkt odniesienia czasowy jako np. rok, suma czasów tych podzbiorów wynosi 365 dni. Dążąc do zapewnienia maksymalnej niezawodności sieci, należy stworzyć warunki, w których obiekt większą część czasu przebywa w podzbiorze A i bardzo rzadko wchodzi do podzbioru C.

Za poziom jakości funkcjonowania sieci kanalizacyjnej można przyjąć wielkość zrzutu ścieków surowych (wskaźnik absolutny) z sieci do otaczającego środowiska w wyniku jej niesprawności (uszkodzenia) lub względny wskaźnik jako stosunek zdolności przepustowej realnej sieci do jej zdolności przepustowej w nieuszkodzonym idealnym stanie. Jeśli sieć całkowicie spełnia swoje zadanie, to wskaźnik absolutny będzie równy zeru, a wskaźnik względny jeden.

Rozpatrując więc kwestie czas  $T_A$  będzie się on składał z okresu  $T_o$ , kiedy sieć jest nieuszkodzona i spełnia swoją funkcję w 100% oraz z części czasu  $T_k$  (gdzie  $k$  jest liczbą jednoczesnych uszkodzeń w sieci), kiedy sieć jest uszkodzona lub jest naprawiana, ale działa tymczasowy schemat transportu ścieków do obejścia awaryjnego unikając zrzutu surowych ścieków do otaczającego środowiska. Natomiast do czasu  $T_B$  celowe jest włączenie okresów, kiedy sieć utraciła częściowo drożność.

Do analitycznego wyrażenia czasu przebywania sieci kanalizacyjnej w stanie sprawności można wykorzystać aparat teorii masowej obsługi. Finalne prawdopodobieństwo znajdowania się sieci kanalizacyjnej w stanie sprawności  $p_o$ , fizycznie stanowiące średni czas  $T_o$  jest wyrażone [5]

$$p_o \text{ (lub } T_o) = \left[ \sum_{k=0}^1 \frac{n!}{(n-k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k + \sum_{k=r+1}^n \frac{n!}{r^{k-r} \cdot r! \cdot (n-k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \right]^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- $k$  – liczba jednocześnie wyłączonych odcinków sieci,
- $r$  – liczba brygad remontowych,
- $n$  – ogólna liczba odcinków sieci, przy długości jednego odcinka 1 km,
- $\lambda$  - intensywność strumienia niesprawności [1/rok, km],
- $\mu$  - intensywność strumienia odnowy [1/rok, km].

Zapewnienie wysokiego poziomu niezawodności funkcjonowania sieci kanalizacyjnych wymaga zmniejszenia intensywność strumienia niesprawności  $\lambda$ . Prace w tym kierunku powinny być wielopłaszczyznowe, obejmować obszar konstrukcji i technologii sieci kanalizacyjnej, eksploatacji i zarządzania. W zakresie konstrukcji i technologii optymalne rozwiązania powinny sprowadzać do minimum proces zagazowania na całej długości sieci, gwarantować wytrzymałość i szczelność sieci kanalizacyjnej. W przypadku grawitacyjnych sieci kanalizacyjnych szczególne znaczenie ma wdrażanie efektywnych środków diagnostyki stanu technicznego sieci, programowania czasu i miejsc możliwych awarii, a w konsekwencji podjęcie przedsięwzięć dla przeprowadzenia prac remontowo-regeneracyjnych.

Zmniejszając czas odnowy zwiększa się niezawodność i efektywność funkcjonowania sieci kanalizacyjnej. Wymaga to dostępności służb remontowych, ich stanu wyposażenia i kompetencji.

Ważnym środkiem zwiększenia niezawodności sieci kanalizacyjnej mogłaby być redundancja struktury przez budowę zbiorników i pierścieniowanie sieci wewnątrz zbiorników, czy dublowanie kolektorów. Z jednej strony zwiększa to pewność odprowadzenia ścieków przez sieć kanalizacyjną ale też zwiększa zdolność remontowania sieci. W grawitacyjnych sieciach kanalizacyjnych transport ścieków odbywa się po jednej drodze, tj. przez jedną, ściśle określoną kolejność urządzeń.

Wprowadzenie rezerwowania w sieci kanalizacyjnej pociąga za sobą większe koszty, ale jeżeli warunki budowy na to pozwalają inwestycja może być realizowana w etapach co przynosi uwidoczniiony efekt ekonomiczny. Przyjmując zdolność przepustową kolektora przy projektowaniu na podstawie prognozowania na jakiś czas obliczeniowego wydatku ścieków w początkowym okresie eksploatacji rzeczywisty wydatek jest znacznie mniejszy, co w efekcie z powodu małych prędkości prowadzi do zamulania kolektora. Z punktu widzenia lepszych warunków eksploatacyjnych celowym wydaje się być zaprojektowanie dwóch kolektorów o mniejszej średnicy i tej samej sumarycznej przepustowości co jednego kolektora o dużej średnicy.

## 4. Podsumowanie

Systemy kanalizacyjne należące do strategicznej infrastruktury uzbrojenia terenu powinna cechować wysoka niezawodność zarówno działania jak bezpieczeństwa. Są one narażone różnego rodzaju niesprawności i awarie oraz wymagają odpowiedniej eksploatacji, których charakterystykę zaprezentowano wyżej.

W zaprezentowanej propozycji oceny niezawodności sieci kanalizacyjnej podano matematyczny model, zachodzący w obszarze, którego każdy punkt przedstawia jeden z możliwych stanów obiektu, a w procesie pracy system przechodzi z jednego stanu w drugi tworząc trajektorię ruchu, charakteryzowanych zbiorem parametrów funkcjonowanie, graficznie przedstawioną za pomocą grafu. Cały zbiór stanów sieci kanalizacyjnej może zawierać 3 podzbiory, których kryterium klasyfikacji jest parametr poziomu jakości funkcjonowania stanów systemu Z.

Zapewnienie wysokiego poziomu funkcjonowania sieci kanalizacyjnych wymaga zmniejszenia intensywności strumienia niesprawności lub zmniejszenia czasu odnowy.

## Bibliografia

- [1] Królikowska J. Niezawodność funkcjonowania i bezpieczeństwa sieci kanalizacyjnej. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010
- [2] Biedugnis S., Smolarkiewicz M.: Bezpieczeństwo i niezawodność układów wodociągowych. Warszawa, 2004
- [3] Królikowska J, Królikowski A.: Analiza porównawcza metod oceny niezawodności systemów usuwania i unieszkodliwiania ścieków, Instal 10/2008
- [4] Kwietniewski M.: Elementy współczesnej eksploatacji dystrybucji wody i odprowadzenia ścieków. Gaz, Woda i Technika Sanitarna Nr 10/2004
- [5] Gal'perin E.M, Strelkov A.K.: Nadežnost' vodootvodajščej seti goroda. Vodosnabženie i Sanitarnaja Technika Nr 3/2013, str. 20-26