

Piotr KALISZ

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

## Ocena niezawodności wodociągów i kanalizacji na terenach górniczych

### Streszczenie

W referacie omówiono zagadnienia związane z wpływem eksploatacji górniczej na niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, uwzględniając wartości wskaźników opisujących uszkodzalność przewodów na terenach górniczych. Dokonano analizy prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy odcinka rurociągu o szeregowej strukturze niezawodnościowej, poddanego działaniu poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu. W analizie tej przyjęto wartości współczynników zmienności odkształceń odpowiadających długościom rozpatrywanych odcinków.

### 1. Wprowadzenie

Niezawodność systemu wodociągowego jest to zdolność do dostarczania przez ten system niezbędnej ilości wody dla ludności i przemysłu, o odpowiedniej jakości i wymaganym ciśnieniu, o każdej porze, w określonych warunkach istnienia i eksploatacji systemu w ciągu założonego czasu (Kwietniewski i in. 1993; Kuś i in. 1995).

Niezawodność systemu kanalizacyjnego jest to zdolność tego systemu do odprowadzania przewidywanej ilości ścieków z danego terenu do określonego odbiornika oraz ich unieszkodliwienia przy określonych warunkach istnienia i eksploatacji tego systemu w ciągu założonego czasu (Kwietniewski i in. 1993)

Niezawodność systemu wodociągowego lub kanalizacyjnego może być rozumiana jako prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy systemu w określonym czasie.

System wodociągowy składa się z ujęć wody, stacji uzdatniania, pompowni, zbiorników i przewodów. System kanalizacyjny natomiast składa się z przewodów, oczyszczalni ścieków i pompowni. Niezawodność tych systemów zależy od niezawodności poszczególnych elementów, połączonych ze sobą szeregowo lub równolegle.

Niniejszy referat dotyczy zagadnień związanych z oddziaływaniem eksploatacji górniczej na wodociągi i kanalizację. Dokonano w nim analizy wskaźników niezawodności przewodów dla terenów górniczych oraz prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy odcinków przewodów poddanych działaniu odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu, wywołanych wpływem podziemnej eksploatacji górniczej. W analizie tej uwzględniono rozrzut losowy wartości wskaźników deformacji, który charakteryzowany jest współczynnikami zmienności o wartościach zależnych od długości rozpatrywanych odcinków, wyznaczonych na podstawie pomiarów terenowych (Popiołek 1976, Kwiatek i in. 1997).

Na niezawodność przewodów na terenach górniczych ma wpływ przede wszystkim oddziaływanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu, a także krzywizn dla przypadków rurociągów o dużych średnicach, szczególnie ze złączami spawanymi (Mokrosz 1985). Wpływ ten rozpatruje się na dwóch charakterystycznych dla przewodów kierunkach – prostopadłym i równoległym do ich osi podłużnej. Oddziaływanie poziomych odkształceń na kierunku prostopadłym do osi podłużnej rurociągu przejawia się znacznymi zmianami parcia gruntu, które wywołują dodatkowe siły osiowe i momenty zginające, działające na ścianki rur (Kalisz 2001, 2005). Oddziaływanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu na kierunku podłużnym do osi przewodu wywołuje dodatkowe siły podłużne w ściankach rur, a w przypadku rurociągów o złączach nasuwkowych lub kielichowych, przemieszczenia rur.

## 2. Wskaźniki niezawodności

Najczęściej stosowanymi wskaźnikami, służącymi do opisu niezawodności obiektów wodociągowych i kanalizacyjnych, są: parametr strumienia uszkodzeń  $\omega(t)$ , częstość uszkodzeń  $C(t)$ , intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$ , średni czas pracy obiektu pomiędzy uszkodzeniami  $T_p$ , średni czas odnowy (niesprawności) obiektu  $T_0$ , wskaźnik gotowości obiektu  $K_g$ , prawdopodobieństwo pracy obiektu  $P(t)$  (Kwietniewski i in. 1993; Kuś i in. 1995).

Parametr strumienia uszkodzeń  $\omega(t)$  jest to prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu w przedziale czasu  $\Delta t$  niezależnie od tego, czy obiekt na początku był sprawny czy nie. Parametr  $\omega(t)$  można obliczyć z próby uzyskanej w badaniach statystycznych ze wzorów:

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t} \quad (2.1)$$

dla obiektu liniowego (przewodu) 
$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{L\Delta t} \quad (2.2)$$

gdzie:

$n(\Delta t)$  – liczba uszkodzeń w czasie  $\Delta t$ ,

$N$  – liczba badanych obiektów,

$L$  – długość badanych przewodów w czasie  $\Delta t$ ,

$\Delta t$  – rozpatrywany przedział czasu.

Parametr strumienia uszkodzeń charakteryzuje niezawodność obiektów odnawialnych, dwustanowych (sprawny, niesprawny), do których zaliczyć można przewody wodociągowe i kanalizacyjne.

Częstość uszkodzeń  $C(t)$  jest to stosunek liczby uszkodzeń do przedziału czasu obserwacji badanych obiektów:

$$C(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t} \quad (2.3)$$

gdzie:

$n(\Delta t)$  – liczba uszkodzeń w czasie  $\Delta t$ ,

$N$  – liczba badanych obiektów, w przypadku obiektów liniowych ich długość  $L$ ,

$\Delta t$  – rozpatrywany przedział czasu, który zawiera w przypadku modelu wielostanowego sprawność i niesprawność obiektów, a także planowe postoje, rezerwy.

Częstość uszkodzeń jest to parametr opisujący bezawaryjność obiektów wielostanowych, dla których uwzględnia się stany sprawności i niesprawności oraz planowane remonty, konserwacje, rezerwy, jest on szczególnym przypadkiem parametru strumienia uszkodzeń  $\omega$ .

Intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  jest prawdopodobieństwem uszkodzenia obiektu w określonym przedziale czasu pod warunkiem, że na początku obiekt był sprawny. Intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  można obliczyć ze wzoru (Kwietniewski i Sudoł 2002):

$$\lambda(t) = \frac{m(t) - m(t + \Delta t)}{m(t)\Delta t} \quad (2.4)$$

gdzie:

$m(t)$  – liczba obiektów sprawnych na początku przedziału czasu  $\Delta t$ ,  
 $m(t + \Delta t)$  – liczba obiektów sprawnych na końcu przedziału czasu  $\Delta t$ ,  
 $\Delta t$  – rozpatrywany przedział czasu.

Intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  charakteryzuje niezawodność obiektów nienaprawialnych, które są wymieniane po ich uszkodzeniu.

Zakładając, że badany strumień uszkodzeń spełnia założenia strumienia bez następstw, pojedynczości i stacjonarność, wartości parametru strumienia uszkodzeń  $\omega(t)$ , częstości uszkodzeń  $C(t)$  i intensywności uszkodzeń  $\lambda(t)$  są sobie równe, a więc parametry te są równoważne (Kwietniewski i Sudoł 2002; Kotowski i Kluska 2000). Wartości tych wskaźników są szacowane zazwyczaj jako średnie wartości dla dłuższego okresu czasu, np. jednego roku.

Średni czas pracy obiektu  $T_p$  określa czas pracy (sprawności) obiektu między dwoma kolejnymi uszkodzeniami.

Średni czas odnowy (niesprawności) obiektu  $T_0$  można obliczyć na podstawie danych eksploatacyjnych ze wzoru:

$$T_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} t_{0i} \quad (2.5)$$

gdzie:

$n_0$  – liczba odnow (niesprawności) w badanym okresie,  
 $t_{0i}$  – czas trwania  $i$ -tej odnowy,  $t_{0i} = t_{zi} + t_{ni}$ ,  
 $t_{zi}$  – czas oczekiwania na  $i$ -tą naprawę,  
 $t_{ni}$  – czas trwania  $i$ -tej naprawy.

Wskaźnik gotowości obiektu  $K_g$  jest prawdopodobieństwem sprawności obiektu lub systemu w dowolnym momencie czasu. Wskaźnik gotowości można obliczyć na podstawie danych eksploatacyjnych ze wzoru:

$$K_g = \frac{T_p}{T_p + T_0} \quad (2.6)$$

Wskaźnik ten dla przewodów można oszacować znając wartość parametru strumienia uszkodzeń  $\omega$  oraz średni czas odnowy:

$$K_g = \frac{1}{1 + \omega T_0 L} \quad (2.7)$$

gdzie  $L$  jest długością przewodu.

Prawdopodobieństwo pracy obiektu  $P(t)$  jest prawdopodobieństwem, że w przedziale czasu między kolejnymi uszkodzeniami obiekt nie ulegnie awarii. Prawdopodobieństwo pracy określają zależności (Kwietniewski i in. 1993):

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (2.8)$$

przy założeniu, że  $\lambda(t) = \lambda = \omega$   $P(t) = \exp(-\omega t)$  (2.9)

Oddziaływanie prowadzonej eksploatacji górniczej na uszkodzalność przewodów określić można wskaźnikiem udziału wpływów tej eksploatacji w uszkodzeniach przewodów  $W_g$  (Zuber 1999):

$$W_g = \frac{C - C_0}{C} \quad (2.10)$$

gdzie:

$C$  – częstość uszkodzeń obiektu,

$C_0$  – częstość uszkodzeń bez wpływu eksploatacji górniczej.

Wskaźnik ten wyrażany jest także jako procentowy wskaźnik uszkodzeń górniczych (Holtoś i in. 2000).

W przypadku kanalizacji określa się również wskaźnik intensywności niekorzystnych zmian spadków dna kanałów (Kotowski i Kluska 2000):

$$\lambda_s = \frac{l(\Delta t)}{L\Delta t} \quad (2.11)$$

gdzie  $l(\Delta t)$  – długość kanałów, które zmieniły spadki na niekorzyść w czasie  $\Delta t$ .

### **3. Badania niezawodności przewodów**

Badania uszkodzalności przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych prowadzone są w celu oceny ich niezawodności i obejmują zarówno przewody tranzytowe, jak i przewody wchodzące w skład sieci. W badaniach tych dąży się do określenia takich wskaźników niezawodności, jak parametr strumienia uszkodzeń  $\omega(t)$ , częstość uszkodzeń  $C(t)$  i intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$ , które traktuje się w określonych warunkach jako równoważne. Na podstawie analiz statystycznych danych eksploatacyjnych wyznaczono średnie wartości wskaźników niezawodności dla poszczególnych elementów systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, a także poszczególnych elementów przewodów w dłuższych przedziałach czasu. Wartości tych wskaźników wyznaczono z uwzględnieniem między innymi materiału przewodu oraz jego średnicy. Badania niezawodności do tej pory koncentrowały się głównie na elementach systemów wodociągowych, zlokalizowanych zarówno na terenach objętych eksploatacją górniczą, jak i poza tymi terenami. Wartości otrzymanych wskaźników niezawodności dla tych terenów są porównywane ze sobą. Natomiast badania systemów kanalizacyjnych były prowadzone w mniejszym zakresie. W tabeli 3.1 przedstawiono średnie wartości jednostkowych intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych, uzyskane na podstawie badań eksploatacyjnych niezawodności.

Tabela 3.1.  
Średnie wartości jednostkowej intensywności uszkodzeń  $\lambda_{sr}$  [ $\text{km}^{-1} \text{rok}^{-1}$ ] przewodów wodociągowych  
(Kwietniewski i in. 10/2002)

Table 3.1.  
Average values of unit intensity of water pipelines faults  $\lambda_{sr}$  [ $\text{km}^{-1} \text{year}^{-1}$ ]

Rodzaj przewodu	Żeliwo	Stal	Żelbet	PVC	PE	Azbesto- cement
1. Tranzytowe						
Na terenach górniczych	0,406	0,088				
Poza terenami górniczymi	0,092	0,046	0,286	0,203	0,06-0,23	0,502
2. Wodociągi miejskie						
Na terenach górniczych	W granicach 0,32-5,6 $\text{km}^{-1} \text{rok}^{-1}$ ; $\lambda_{sr} = 3,47 \text{ km}^{-1} \text{rok}^{-1}$					
Poza terenami górniczymi	0,607, 0,97; 0,37-1,02	1,05; 0,11-0,29		0,07-0,344	0,006-0,03	0,644
3. Sieci wodociągów wiejskich	0,535	0,511		0,086		0,528
4. Przyłącza wodociągowe	4,024	4,02				

Badania niezawodności potwierdzają, że uszkodzalność przewodów tranzytowych oraz przewodów sieci wodociągowych i kanalizacyjnych jest znacznie wyższa na terenach górniczych, niż poza tymi terenami. Uszkodzalność przewodów wodociągowych na terenach górniczych, charakteryzowana intensywnością uszkodzeń  $\lambda_{sr}$ , przewyższa średnio ponad dwukrotnie uszkodzalność przewodów zlokalizowanych na obszarach bez wpływów eksploatacji górniczej. Udział awarii spowodowanych oddziaływaniem eksploatacji określony wskaźnikiem udziału jej wpływów w uszkodzeniach przewodów  $W_g$  dla sieci wodociągowych, poddanych badaniom w miastach Górnego Śląska, dochodzi nawet do 0,83 (Zuber 1999), a w Polkowicach na osiedlu Robotniczym wynosi średnio 0,30 (Holtoś in. 2000). Ponadto wyniki badań wskazują, że o niezawodności przewodów na terenach górniczych w znacznej mierze decydują liczniej występujące rozszczelnienia złącz. Na przykład wartość jednostkowych intensywności uszkodzeń  $\lambda$  połączeń kielichowych przewodów żeliwnych na terenach górniczych wynosi  $0,325 \text{ rok}^{-1} \text{km}^{-1}$ , a dla przewodów poza tymi terenami wynosi  $0,015 \text{ rok}^{-1} \text{ km}^{-1}$ . Natomiast wartości jednostkowych intensywności uszkodzeń dla rur wynoszą odpowiednio  $0,081 \text{ rok}^{-1} \text{km}^{-1}$  i  $0,044 \text{ rok}^{-1} \text{km}^{-1}$  (Kwietniewski i Sudoł 2002). Jedną z przyczyn awarii przewodów stalowych są uszkodzenia izolacji zewnętrznej występujące podczas ruchów rur w kompensatorach. Miejsca z uszkodzoną izolacją po wysunięciu z kompensatora w czasie oddziaływania eksploatacji ulegają korozji (Zuber 1999).

W przypadku przewodów kanalizacyjnych istotne znaczenie mają również niekorzystne zmiany spadków, jakie są powodowane nierównomiernymi osiadaniami powierzchni terenu. Zmiany te opisać można wskaźnikiem intensywności niekorzystnych zmian spadków dna kanałów  $\lambda_s$  według wzoru (2.11), którego wartość dla sieci kanalizacji sanitarnej w Polkowicach wynosiła  $0,0094 \text{ rok}^{-1}$ , a sieci kanalizacji deszczowej wynosiła  $0,005 \text{ rok}^{-1}$  (Kotowski i Kluska 2000). Zmiany te powodują w przypadku kanalizacji grawitacyjnej zmniejszenie ilości przepływających ścieków oraz podtopienia kanałów i studzienek kanalizacyjnych.

Na terenach górniczych obserwuje się także znacznie częściej występujące uszkodzenia kanałów, przejawiające się spękaniem rur oraz kręgów i kinet studzienek (Kotowski i Kluska 2000). W szczególności obserwuje się liczne spęknięcia rur oraz uszkodzenia i rozszczelnienia złącz, obejmujące długie odcinki przewodów w rejonach intensywnej eksploatacji górniczej. W rejonach tych następuje wypływ ścieków do gruntu lub dopływ wód gruntowych do kanałów, a także dochodzi do ich załamania. Zjawiska tego typu obserwowane są między innymi w przypadku kanałów kamionkowych, odprowadzających ścieki bytowo-gospodarcze na terenie Katowic (Muszyński i in. 2005).

#### **4. Analiza niezawodności odcinka przewodu na terenach górniczych**

Niezawodność wodociągów i kanalizacji na terenach górniczych zależy przede wszystkim od niezawodności przewodów, składających się z rur, połączeń oraz uzbrojenia w postaci zasuw, uzbrojenia ochronnego, odwodnień i odpowietrzeń. Uszkodzalność przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych na terenach górniczych jest znacznie wyższa od uszkodzalności przewodów poza tymi terenami. Poprawa niezawodności wodociągów i kanalizacji na terenach górniczych może następować przez ich modernizację, renowację, budowę nowych przewodów o odpowiedniej odporności na wpływy eksploatacji górniczej, a także przez montaż dodatkowego uzbrojenia (Denczew 2004). Zmniejszyć można w ten sposób wartości jednostkowych wskaźników niezawodności.

Niezawodność wodociągów i kanalizacji wyrażana jest także wskaźnikiem gotowości  $K_g$  (2.7). Na wartość wskaźnika gotowości przewodu, a więc prawdopodobieństwa jego sprawności, ma oprócz wartości jednostkowych wskaźników niezawodności również wpływ średni czas odnowy  $T_0$ , który jest równy sumie średniego czasu oczekiwania na naprawę i średniego czasu trwania naprawy. Im krótszy czas odnowy, tym wyższa wartość wskaźnika gotowości przewodu. Zarówno czas oczekiwania na naprawę, jak i czas samej naprawy zależy w dużym stopniu od sprawności i wyposażenia zespołu ją wykonującego. Czas odnowy zależy również od sprawności i dostępności uzbrojenia, lokalizacji uszkodzenia, rodzaju tego uszkodzenia, rodzaju materiału przewodu, jego średnicy, rodzaju gruntu i głębokości posadowienia przewodu, rodzaju nawierzchni oraz możliwości zastosowania odpowiedniego sprzętu (Bajer i Przebinda 2005). Zatem usprawnienie procesu usuwania awarii w zakresie organizacyjnym i technicznym ekonomicznym ma wpływ na niezawodność wodociągów i kanalizacji (Denczew 2003), w szczególności na terenach górniczych.

W celu zmniejszenia wartości jednostkowych wskaźników niezawodności wodociągów i kanalizacji na terenach górniczych, tym samym poprawy niezawodności przewodów, należy zapewnić również ich odpowiednią odporność na działanie przede wszystkim poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu, a w przypadku przewodów o dużych średnicach również na oddziaływanie krzywizn.

Pojedynczy przewód stanowi system szeregowo połączonych odcinków i elementów uzbrojenia, a więc stanowi obiekt złożony o szeregowej strukturze niezawodnościowej. W takim obiekcie niesprawność dowolnego elementu powoduje niesprawność całego obiektu. Prawdopodobieństwo pracy (sprawności)  $P_s(t)$  obiektu o szeregowej strukturze niezawodnościowej jest iloczynem prawdopodobieństw pracy wszystkich jego elementów, przy założeniu niezależności ich uszkodzeń. Prawdopodobieństwo to może być wyrażone wzorem (Kwietniewski i in. 1993):

$$P_s(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (4.1)$$

gdzie:

$P_i(t)$  – prawdopodobieństwo pracy  $i$ -tego złącza,

$n$  – liczba elementów.

W celu zabezpieczenia rurociągów przed działaniem poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu na kierunku równoległym do osi podłużnej tego rurociągu zwiększa się odpowiednio długości stosowanych złącz kielichowych i nasuwkowych. W przypadku przewodów o złączach spawanych (stalowych) rurociąg dzieli się na odcinki o długościach pozwalających na przeniesienie podłużnych sił osiowych, wynikających z oddziaływania przemieszczeń cząstek gruntu względem powierzchni zewnętrznej rurociągu, powodowanych odkształceniami. Długość efektywna złącz i kompensatorów jest dostosowywana do prognozowanych wartości odkształceń lub kategorii terenów górniczych, przyjmując odpowiedni współczynnik tolerancji, określający prawdopodobieństwo nieprzekroczenia ekstremalnych wartości odkształceń. Zatem odcinek rozpatrywanego przewodu, zlokalizowanego na terenie górniczym, stanowi element szeregowo połączonych rur i złącz o odpowiednim prawdopodobieństwie bezawaryjnej pracy z uwagi na możliwość ich uszkodzenia lub rozszczelnienia przemieszczaniem końców tych rur.

Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy pojedynczego złącza z uwagi na oddziaływanie poziomych odkształceń warstwy gruntu zależy od jego długości efektywnej oraz od wartości działających na to złącze w danej chwili odkształceń. Niezawodność złącza można wtedy oszacować określając wartość indeksu niezawodności  $t$  przy założeniu rozkładu normalnego (Biegus 1999), stanowiącego obiektywną miarę niezawodności złącza:

$$t = \frac{\overline{\Delta l}_0 - \overline{\Delta l}}{\sqrt{s_{\Delta_0}^2 + s_{\Delta l}^2}} = \frac{\overline{\Delta l}_0 - \overline{\Delta l}}{\sqrt{(v_{\Delta_0}^2 \overline{\Delta l}_0^2 + M_{\Delta l}^2 \overline{\Delta l}^2)}} \quad (4.2)$$

gdzie:

$\overline{\Delta l}_0$  – średnia długość efektywna złącza,

$\overline{\Delta l}$  – średnia wartość wymaganego zakresu gry dylatacyjnej,

$s_{\Delta_0}$  – odchylenie standardowe długości złącza,

$s_{\Delta l}$  – odchylenie standardowe wymaganego zakresu gry dylatacyjnej,

$v_{\Delta_0}$  – współczynnik zmienności długości efektywnej złącza,

$M_{\Delta l}$  – współczynnik zmienności dla wymaganej dylatacji.

Wartości współczynników zmienności długości produkowanych złącz, kompensatorów i rur nie są zazwyczaj większe od 0,02. Ponadto uwzględnić należy błędy montażu, które przy odpowiednim nadzorze nie powinny być większe niż 0,05 długości efektywnej złącza. Zatem wartości te są małe w porównaniu ze współczynnikami zmienności poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu, które dla długości standardowej bazy pomiarowej 25 m wynoszą 0,2 dla rozluźniania i 0,3 dla zagęszczania gruntu, a dla mniejszych długości rozpatrywanych rur są wyższe. Współczynniki zmienności poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu dla innych długości niż długość standardowej bazy pomiarowej można określić na podstawie wzoru Batkiewicza (Kwiatkiewicz i in. 1997; Popiołek 1976):

$$M(l) = M(l_0) \sqrt{\frac{l_0}{l}} \quad (4.3)$$

gdzie:

$M(l_0)$  – współczynnik zmienności odkształceń dla standardowej bazy pomiarowej,

$l_0$  – długość standardowej bazy pomiarowej, wynosząca 25 m,

$l$  – długość rozpatrywanego odcinka.

Średnia efektywna długość złącza powinna spełniać warunek (Kalisz 2005):

$$\bar{\Delta}l_0 \geq 2\bar{\varepsilon}l \left[ 1 + n \frac{\sqrt{M_r^2(l) + M_z^2(l)}}{2} \right] \gamma_D \gamma_{D_0} \quad (4.4)$$

gdzie:

$\bar{\varepsilon}$  – średnia (przeciętna) wartość odkształceń,

$l$  – odległość między środkami sąsiednich rur równa długości rury,

$n$  – współczynnik tolerancji, zależny od prawdopodobieństwa nieprzekroczenia wartości ekstremalnych, dla prawdopodobieństwa 0,95  $n = 1,645$ ,

$M_r(l), M_z(l)$  – współczynniki zmienności odkształceń odpowiednio dla rozluźniania i zagęszczania gruntu, dla standardowej długości bazy pomiarowej  $M_r(l_0) = 0,2$ ,  $M_z(l_0) = 0,3$ ,

$\gamma_D$  – współczynnik bezpieczeństwa dla odporności złącza (Kwiatek 2005),

$\gamma_{D_0}$  – współczynnik bezpieczeństwa dla deformacji podłoża (Kwiatek 2005).

Po podstawieniu wzoru (4.4) do wzoru (4.2) i pominięciu małych wartości współczynników zmienności, charakteryzujących wymiary elementów, indeks niezawodności  $t$  dla pojedynczo rozpatrywanego złącza można obliczyć ze wzoru:

$$t = \frac{\left[ 2 + n \sqrt{M_r^2(l) + M_z^2(l)} \right] \gamma_D \gamma_{D_0} - 2}{\sqrt{M_r^2(l) + M_z^2(l)}} \quad (4.5)$$

Wartość tego współczynnika pozwala na określenie niezawodności złącza jako dystrybucyjny rozkład normalny, a więc prawdopodobieństwa  $P_i(t)$ , że nie ulegnie ono uszkodzeniu lub rozszczelnieniu z uwagi na zbyt duże przemieszczenia końców rur w danych warunkach odkształcenia warstwy gruntu, z uwzględnieniem odpowiednich wartości współczynników zmienności tych odkształceń dla długości  $l$  rozpatrywanych rur.

Wartość odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu  $\varepsilon$  jest nierównomiernie rozłożona na długości promienia zasięgu wpływów głównych  $r$ . Maksymalna wartość tych odkształceń występuje w strefie odległej o około  $0,4 r$  od krawędzi eksploatacji. Wartość odkształceń działających na złącza rurociągu poza tą strefą jest mniejsza, a tym samym i prawdopodobieństwo wysunięcia końców rur ze złącz jest mniejsze od prawdopodobieństwa wysunięcia końców rur ze złącz znajdujących się w tym samym czasie w strefie największych odkształceń gruntu. Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy całego rozpatrywanego odcinka rurociągu o szeregowej strukturze niezawodnościowej jest wyższe od prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy takiego odcinka, gdyby maksymalne wartości odkształceń, dla jakich



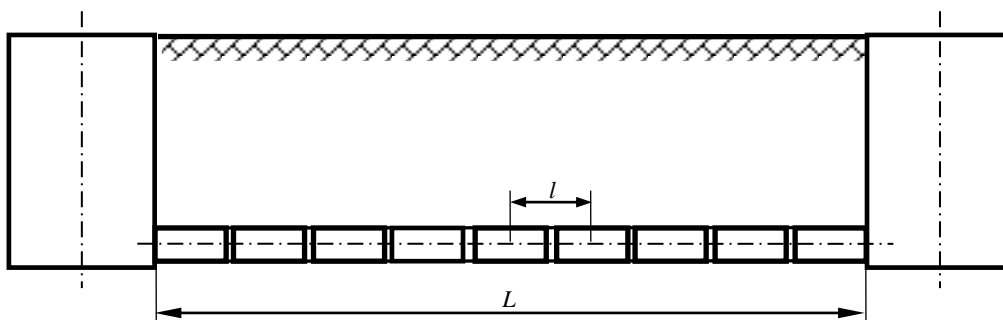
określono odporność poszczególnych złączy, ujawniły się jednocześnie na całej jego długości. Do określenia tego prawdopodobieństwa niezbędna jest znajomość rozkładu wartości odkształceń na długości rurociągu lub też ich średniej wartości. Wtedy prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy rozpatrywanego odcinka rurociągu można określić wzorem:

$$P_s(t) = [P_i(t)]^z \quad (4.6)$$

gdzie:

$P_i(t)$  – prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy złącza dla przypadku wystąpienia odkształceń średnich na rozpatrywanym odcinku rurociągu z uwzględnieniem współczynników zmienności odkształceń dla długości tego odcinka,  
 $z$  – liczba złączy rozpatrywanego odcinka rurociągu.

Należy zwrócić również uwagę na to, że im dłuższy odcinek rurociągu, tym niższa średnia wartość odkształceń, jakie mogą oddziaływać na ten odcinek, co wynika z analizy odkształceń dla różnych baz pomiarowych (Zych 1993). Ponadto wartość współczynników zmienności dla odcinków o długościach porównywalnych i większych od długości standardowej bazy pomiarowej są znacznie niższe od współczynników zmienności, jakie należy uwzględnić przy określaniu niezawodności pojedynczego złącza. Dla pojedynczego złącza przyjmuje się współczynniki zmienności odkształceń odpowiadające odległości między środkami sąsiadujących ze sobą rur, która jest równa ich długości. Rurociąg zabezpieczony na działanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu składa się ze złączy o jednakowej długości, przygotowanych z określonym prawdopodobieństwem na przejście przemieszczeń wynikających z ekstremalnych odkształceń gruntu, jakie mogą wystąpić na odcinku równym odległości między środkami rur. Zważywszy, że dla całego rozpatrywanego odcinka o długości  $L$  mogą w tej samej chwili wystąpić poziome odkształcenia przypowierzchniowej warstwy gruntu o ekstremalnych wartościach, wynikających z uwzględnienia współczynników zmienności dla tego odcinka, proponuje się przy obliczaniu prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy takiego odcinka ze wzoru (4.6), wyznaczenie prawdopodobieństwa  $P_i(t)$  dla pojedynczego złącza w oparciu o wartości współczynników zmienności odkształceń odpowiadające długości  $L$ . Przykład odcinka przewodu o szeregowej strukturze niezawodnościowej przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Odcinek rurociągu o szeregowej strukturze niezawodnościowej  
 Fig. 4.1. Section of pipeline with a serial structure

Wartość indeksu niezawodności  $t$  dla pojedynczego złącza, przy szacowaniu prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy odcinka przewodu z uwagi na wartość przemieszczeń rur można obliczyć ze wzoru:

$$t = \frac{\left[ 2 + n\sqrt{M_r^2 + M_z^2} \sqrt{\frac{l_0}{l}} \right] \gamma_D \gamma_{D_0} - 2}{\sqrt{M_r^2 + M_z^2}} \quad (4.7)$$

Przyjmując wartości współczynników bezpieczeństwa równe 1, wzór (4.7) przybiera postać:

$$t = n\sqrt{\frac{l_0}{l}} \quad (4.8)$$

Należy zwrócić uwagę na możliwość niewłaściwej pracy uszczelnienia podczas przemieszczania końców rur w złączu, co powinno być sprawdzone w badaniach szczelności.

Odcinek przewodu o szeregowej strukturze niezawodnościowej, złożony ze złącz charakteryzujących się określoną odpornością na wpływy podziemnej eksploatacji górniczej, jest częścią przewodów kanalizacyjnych lub wodociągowych o złożonej strukturze niezawodnościowej, dla których szacowane jest prawdopodobieństwo pracy (sprawności).

## 5. Zakończenie

Oddziaływanie eksploatacji górniczej na przewody wodociągowe i kanalizacyjne powoduje, że wartości wskaźników niezawodności charakteryzujących uszkodzalność przewodów na terenach górniczych są na ogół znacznie wyższe od wartości wskaźników niezawodności poza tymi terenami. Przyczyną zawodności przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych na terenach górniczych są uszkodzenia rur, przede wszystkim awarie występujące w złączach. Poprawa niezawodności wodociągów i kanalizacji na terenach górniczych może następować przez ich modernizację, renowację, montaż dodatkowego uzbrojenia, a także budowę nowych przewodów o odpowiedniej odporności na wpływy eksploatacji górniczej. Wpływ na niezawodność ma również usprawnienie procesu usuwania awarii, dzięki czemu skraca się czas odnowy, zwiększając w ten sposób wartość wskaźnika gotowości systemu.

Odcinek przewodu o szeregowej strukturze niezawodnościowej, złożony z rur ze złączami o określonej odporności na wpływy podziemnej eksploatacji górniczej, stanowi element systemu przewodów kanalizacyjnych lub wodociągowych. Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy takiego odcinka, poddanego działaniu odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu, zależy od ich wartości. Odkształcenia charakteryzują się znacznym rozproszeniem losowym o współczynnikach zmienności, których wartość uzależniona jest od długości rozpatrywanych odcinków. Wartości współczynników zmienności dla długości odcinków porównywalnych i większych od długości standardowej bazy pomiarowej są znacznie niższe od współczynników zmienności, jakie należy uwzględniać przy określaniu niezawodności pojedynczego złącza między krótkimi rurami. W związku z tym proponuje się szacowanie niezawodności takiego odcinka przewodu z uwzględnieniem prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy złącz dla wartości współczynników zmienności odkształceń odpowiadających jego długości.

## Literatura

- [1] Bajer J., Przebinda A. 2005: Czynniki wpływające na czas usuwania awarii przewodów wodociągowych i ich uzbrojenia. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 11, 20–22.
- [2] Biegus A. 1999: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. PWN, Warszawa – Wrocław.
- [3] Denczew S. 2003: Organizacyjne, techniczno-technologiczne oraz ekonomiczne możliwości usprawnienia zjawiska „uszkodzenie-usunięcie” w procesie eksploatacji układów wodociągowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 9, 305–307.
- [4] Denczew S. 2004: Usprawnienie funkcjonowania systemów kanalizacji grawitacyjnej poprzez montaż dodatkowego uzbrojenia. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 9, 295–298.
- [5] Holtoś H. i in. 2000: Sieci wodociągowe na terenach oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na przykładzie Polkowic. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 11, 450–453.
- [6] Kalisz P. 2001: Wpływ eksploatacji górniczej na obciążenia poprzeczne rurociągów podziemnych z tworzyw sztucznych. GIG, Katowice (rozprawa doktorska).
- [7] Kalisz P. 2005: Probabilistyczna analiza oddziaływania eksploatacji górniczej na rurociągi wykonane metodą przeciskową. Praca zbiorowa pod red. prof. J. Kwiatka pt. Problemy eksploatacji górniczej pod terenami zagospodarowanymi. Główny Instytut Górnictwa. Katowice, 230–241.
- [8] Kalisz P. 2005: Probabilistyczna analiza wpływu eksploatacji górniczej na rurociągi. Praca zbiorowa. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo z. 270. Gliwice, 109–118.
- [9] Kotowski A., Kluska W. 2000: Badania sprawności sieci kanalizacyjnej na terenach szkód górniczych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 11, 445–449.
- [10] Kwiatek J. i in. 1997: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. GIG, Katowice.
- [11] Kwiatek J. 2002: Obiekty budowlane na terenach górniczych. GIG, Katowice.
- [12] Kwiatek J. 2004: Podstawy budownictwa na terenach górniczych. UWND AGH, Kraków.
- [13] Kwiatek J. 2005: Bezpieczeństwo konstrukcji obiektów budowlanych na terenach górniczych. Praca zbiorowa pod redakcją J. Kwiatka pt. Problemy eksploatacji górniczej pod terenami zagospodarowanymi. Główny Instytut Górnictwa. Katowice, 270–277.
- [14] Kwietniewski M. i in. 1993: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa.
- [15] Kwietniewski M. i in. 2002: Wpływ różnych czynników na uszkodzalność przewodów sieci wodociągowych w świetle eksploatacyjnych badań niezawodności. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 10, 366–371.
- [16] Kwietniewski M., Sudoł M. 2002: Ocena uszkodzalności przewodów tranzytowych w świetle eksploatacyjnych badań niezawodności. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 9, 325–329.
- [17] Mokrosz R. 1985: Wprowadzenie do mechaniki budowli liniowych zagłębionych w gruncie na terenach górniczych. Zakład Narodowy im. Ossolińskich – PAN, Wrocław.
- [18] Muszyński i in. 2005: Ocena wpływu eksploatacji górniczej KWK „Katowice-Kleofas” na stan techniczny sieci kanalizacji sanitarnej Śródmieścia Katowic i dzielnicy Załęże na podstawie inwentaryzacji geodezyjnej tej sieci. Prace GIG niepublikowane, Katowice.
- [19] Popiołek E. 1976: Rozproszenie statystyczne odkształceń poziomych terenu w świetle geodezyjnych obserwacji skutków eksploatacji górniczej. *Zeszyty Naukowe AGH Geodezja* z. 44, Kraków.
- [20] Stoch T. 2005: Wpływ warunków geologiczno-górnicznych eksploatacji złoża na losowość procesu przemieszczeń i deformacji powierzchni terenu. AGH, Kraków (rozprawa doktorska).
- [21] Zuber T. 1999: Wpływ eksploatacji górniczej na uszkodzalność sieci wodociągowych i kanalizacyjnych na obszarze wybranych miast Śląska. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* nr 6, 207–213.
- [22] Zych J. 1993: Wpływ odległości punktów w liniach obserwacyjnych na wielkość i rozkład mierzonych wskaźników deformacji. Materiały konferencji naukowo-technicznej II Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych. *Ustroń*, 177–186.

### **Reliability of water-supply and sewage systems on mining grounds**

In the paper problems related to impact of mining activities onto reliability of water-supply and sewage systems were discussed, taking into account values of indicators describing damageability of pipelines on the mining grounds. Probability analysis was done of non-problem work for pipeline section with serial reliability structure, subjected to an effect of horizontal deformations of subsurface ground layer. In this analysis the values of coefficients of deformations' variability corresponding to the lengths of considered sections were assumed.

*Przekazano: 17 marca 2006 r.*