

Piotr KALISZ

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

WPLYW EKSPLOATACJI GÓRNICZEJ NA NIEZAWODNOŚĆ PRZEWODÓW WODOCIĄGOWYCH

Streszczenie. W referacie omówiono zagadnienia związane z wpływem eksploatacji górnictwa na niezawodność systemów wodociągowych, 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.

IMPACT OF MINING EXTRACTION ON RELIABILITY OF WATER-SUPPLY PIPELINES

Summary. In the paper problems related to impact of mining activities onto reliability of water-supply 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.

1. Wprowadzenie

Niezawodność systemu wodociągowego jest to zdolność tego systemu do dostarczania w ciągu założonego czasu niezbędnej ilości wody o odpowiedniej jakości i wymaganym ciśnieniu, o każdej porze i w określonych warunkach eksploatacji [3],[4]. Miarą niezawodności systemu wodociągowego może być prawdopodobieństwo jego bezawaryjnej pracy.

Niezawodność systemów wodociągowych na terenach górniczych zależy w dużej mierze od niezawodności przewodów. Wpływ na niezawodność przewodów na tych terenach ma przede wszystkim oddziaływanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu, a dla rurociągów o większych średnicach także krzywizn [3],[10]. Odkształcenia te charakteryzują się znacznym rozrzutem losowym. Ekstremalne wartości odkształceń dla rozluźniania ε^r i zagęszczania ε^z warstwy gruntu, jakie mogą działać z danym prawdopodobieństwem na odcinek rurociągu o długości l , można określić opierając się na wartościach współczynników zmienności $v_r(l)$ i $v_z(l)$ [10],[11],[13] według wzorów:

$$\varepsilon^r = \varepsilon[1 + nv_r(l)] \quad \varepsilon^z = \varepsilon[1 + nv_z(l)] \quad (1)$$

gdzie:

ε - średnia wartość ekstremalnych odkształceń,

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

Wpływ eksploatacji górniczej na przewody rozpatruje się na dwóch charakterystycznych kierunkach – prostopadłym i równoległym do ich osi podłużnej. W przypadku przewodów ciśnieniowych najistotniejsze znaczenie ma oddziaływanie na kierunku równoległym.

2. Charakterystyka wskaźników niezawodności przewodów wodociągowych

Podziemna eksploatacja górnicza powoduje uszkodzenia przewodów, które przyczyniają się do obniżenia niezawodności systemów wodociągowych. Uszkodzenia obserwowane na terenach górniczych nie zawsze wynikają z oddziaływania eksploatacji, gdyż na uszkodzalność przewodów ma wpływ wiele czynników, między innymi błędy wykonawcze. Na terenach górniczych jednoznacznie natomiast można stwierdzić zmiany linii ciśnień wodociągów, wywoływane nierównomiernymi obniżeniami powierzchni. Zmiany te mogą powodować przekroczenie dopuszczalnych wartości ciśnienia roboczego w przewodach.

W celu oceny niezawodności przewodów wodociągowych prowadzone są badania ich uszkodzalności, obejmujące przewody tranzytowe i przewody sieci rozdzielczych. Na podstawie analiz statystycznych danych eksploatacyjnych wyznacza się średnie wartości wskaźników niezawodności dla poszczególnych odcinków przewodów w dłuższych przedziałach czasu. Najczęściej określa się średnią jednostkową intensywność uszkodzeń $\lambda(\Delta t)$ przewodu o długości 1 km (lub 10 km) w ciągu 1 roku (lub 10 lat) [5],[6]:

$$\lambda(\Delta t) = \frac{n(\Delta t)}{L\Delta t} \quad (2)$$

gdzie:

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

L - długość badanych przewodów w czasie Δt ,

Δt - rozpatrywany przedział czasu.

Średnie wartości intensywności uszkodzeń z uwzględnieniem materiału przewodu przedstawiono w tablicy 1 [3],[4],[5],[6]. Wartość intensywności uszkodzeń λ_{sr} wyraża liczbę uszkodzeń na 1 km długości przewodu w ciągu 1 roku.

Tablica 1

Jednostkowa intensywności uszkodzeń λ_{sr} [uszk/km·rok] przewodów wodociągowych

Rodzaj przewodu	Żeliwo	Stal	Żelbet	PVC	PE	Azbesto- cement
1. Tranzytowe						
Na terenach górniczych	0,406	0,088				
Poza terenami górnymi	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 km ⁻¹ rok ⁻¹ ; $\lambda_{sr} = 3,47$ km ⁻¹ rok ⁻¹					
Poza terenami górnymi	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. Wodociągi wiejskie	0,535	0,511		0,086		0,528
4. Przyłącza wodociągowe	4,024	4,02				

Badania niezawodności potwierdzają na ogół niekorzystny wpływ eksploatacji górniczej na wodociągi, gdyż średnie wartości intensywności uszkodzeń λ_{sr} przewodów tranzytowych oraz przewodów sieci są przeciętnie ponaddwukrotnie wyższe na terenach górniczych niż poza tymi terenami. Udział awarii spowodowanych oddziaływaniem eksploatacji górniczej sieci wodociągowych w miastach Górnego Śląska dochodzi nawet do 83% [13]. Wyniki badań uszkodzalności przewodów wodociągowych wskazują również, że o niezawodności przewodów na terenach górniczych w znacznym stopniu decydują rozszczelnienia złączy. Na przykład, wartość jednostkowych intensywności uszkodzeń λ połączeń kielichowych przewodów żeliwnych na terenach górniczych wynosiła 0,325 uszk/rok·km, a dla przewodów poza tymi terenami wynosiła 0,015 uszk/rok·km. Natomiast wartości jednostkowych uszkodzeń dla rur wynosiły odpowiednio 0,081 uszk/rok·km i 0,044 uszk/rok·km [5],[6]. Awarie przewodów powodują także w niektórych przypadkach uszkodzenia izolacji zewnętrznej przewodów stalowych, występujące podczas ruchów rur w kompensatorach. Miejsca z uszkodzoną izolacją po wysunięciu z kompensatora ulegają korozji [13].

3. Wpływ eksploatacji górniczej na niezawodność przewodów

3.1. Siły podłużne

Ze względu na oddziaływanie eksploatacji górniczej na kierunku podłużnym przewody można podzielić na przewody o konstrukcji ciągłej oraz odcinkowe. Przewody odcinkowe są zbudowane z rur o złączach nasuwkowych lub kielichowych o długości do 6 m.

Oddziaływanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu na kierunku równoległym do osi przewodu wywołuje dodatkowe siły podłużne w ściankach rur na skutek tarcia gruntu o ich powierzchnię zewnętrzną. Niezawodność przewodów o konstrukcji ciągłej zależy od możliwości przejścia tych sił. Jeżeli nośność graniczna przewodu na skutek oddziaływania poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu jest przekroczona, dzieli się go na odcinki [3]. Pomiędzy tymi odcinkami wbudowywane są kompensatory. Wartość podłużnych sił osiowych jest równa sumie sił tarcia gruntu o powierzchnię zewnętrzną rurociągu lub sił ścinających grunt wokół tej powierzchni, przy czym do obliczeń przyjmuje się wartość mniejszą. Zazwyczaj jest to graniczna siła tarcia gruntu o powierzchnię rury, można ją obliczyć ze wzoru [7],[8],[10]:

$$\tau_g = \sigma_n f \quad (3)$$

gdzie:

σ_n - średnia wartość obciążeń normalnych działających na pobocznice rurociągu,

f - współczynnik tarcia gruntu o pobocznice rurociągu.

Średnia wartość obciążeń stycznych τ_g zależy od średniej wartości obciążeń normalnych, występujących na obwodzie rury i można ją wyznaczyć ze wzoru

$$\sigma_{n\acute{s}r} = \frac{(\gamma h + p_n)(1 + \xi)}{2} \quad (4)$$

gdzie:

γ - ciężar objętościowy gruntu,

h - zagłębienie przewodu,

p_n - obciążenie naziomu,

ξ - współczynnik rozporu bocznego gruntu.

Podsypka i obsypka rurociągu są zazwyczaj wykonane z piasku i można przyjąć $\xi = 0,5$. Wtedy wartość podłużnych sił osiowych N w środku rozpatrywanego odcinka, rozciągających lub ściskających, równa jest sumie sił stycznych z połowy jego długości:

$$N = \frac{3\pi D l}{8} (\gamma h + p_n) f \quad (5)$$

gdzie:

l - długość rozpatrywanego odcinka rurociągu,

D - zewnętrzna średnica przewodu.

Wartość sił podłużnych ze względu na zmienność właściwości gruntu charakteryzuje się rozrzutem losowym. Współczynnik zmienności losowej siły podłużnej, określony na podstawie wzoru na odchylenie standardowe funkcji złożonej, wynosi [1],[8]:

$$v_N = \sqrt{v_f^2 + \left[\frac{\gamma h}{(\gamma h + p_n)} \right]^2 (v_\gamma^2 + v_z^2)} \quad (6)$$

gdzie:

v_f - współczynnik zmienności tarcia gruntu,

v_γ - współczynnik zmienności ciężaru objętościowego gruntu,

v_z - współczynnik zmienności zagłębienia przewodu.

Przewody odkształcalne z tworzyw sztucznych o konstrukcji ciągłej w środkowej części ulegają odkształceniom o wartościach równych poziomym odkształceniom warstwy gruntu [9]. Wartość podłużnych sił osiowych N w tym przypadku wyznaczyć można ze wzoru:

$$N = (E\varepsilon + v_l \sigma_a) F \quad (7)$$

gdzie:

σ_a - naprężenia obwodowe, wywołane ciśnieniem wewnętrznym,

v_l - współczynnik *Poissona* materiału rur,

E - moduł sprężystości materiału rury,

F - pole przekroju poprzecznego rury.

Współczynnik zmienności dla sił podłużnych w tym przypadku można obliczyć ze wzoru:

$$v_N = \sqrt{v_\varepsilon^2 + v_E^2 + v_F^2} \quad (8)$$

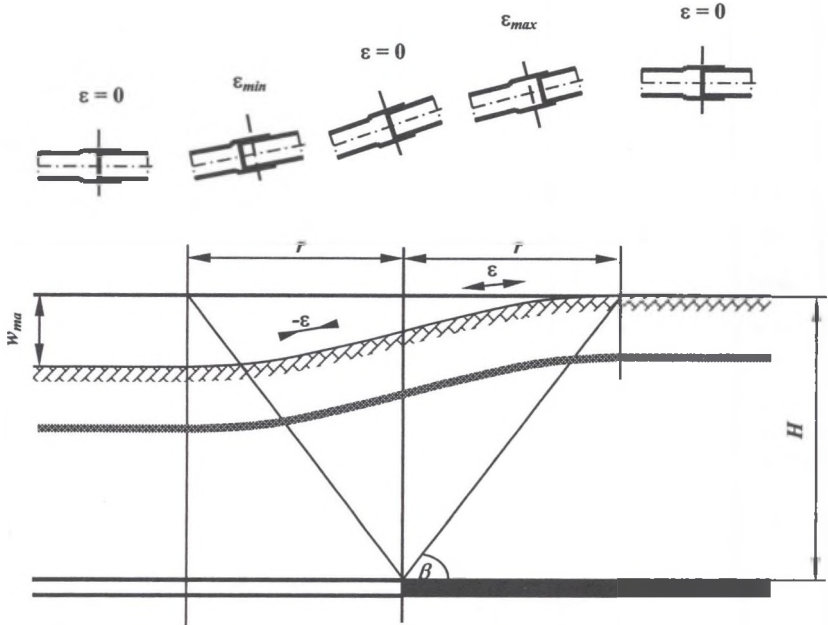
W przypadku rurociągów o dużych średnicach ($D \geq 600$ mm) i małej podłużnej odkształcalności krzywizny mogą wywoływać znaczące momenty zginające, które należy uwzględnić w obliczeniach [3],[10].

3.2. Przemieszczenia rur

Oddziaływanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu na kierunku równoległym do osi podłużnej przewodu powoduje podłużne przemieszczenia rur, z których zbudowane są rurociągi odcinkowe. Niezawodność przewodów odcinkowych na terenach górniczych zależy od możliwości przejmowania tych przemieszczeń przez złącza lub

kompensatory. W związku z tym dla projektowanych przewodów należy uwzględnić wartość poziomych odkształceń ε przypowierzchniowej warstwy gruntu i ich rozproszenie losowe, odpowiednie do długości rur, przyjmując przy tym odpowiednie prawdopodobieństwo ich niezawodnej pracy.

Na rysunku 1 przedstawiono oddziaływanie eksploatacji górniczej na kierunku podłużnym do osi rurociągu o wydłużonych złączach kielichowych dla kompensacji zmian długościowych.



Rys. 1. Wpływ eksploatacji górniczej na przewód z wydłużonymi złączami
Fig. 1. Impact of maining extraction on pipeline with elongated connectors

Właściwie zabezpieczone złącza powinny być w odpowiedni sposób wydłużone, a końce rur ustawiane z odpowiednim luzem początkowym [2]. Minimalna długość efektywna złącza Δl_0 na terenach górniczych, z uwzględnieniem rozproszenia losowego poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu, powinna spełniać warunek [8]:

$$\Delta l_0 \geq 2\varepsilon l \left[1 + n \frac{\sqrt{v(l_0)_r^2 + v(l_0)_z^2}}{2} \sqrt{\frac{l_0}{l}} \right] \quad (9)$$

gdzie:

l - długość rur,

$v(l_0)_r$ - współczynnik zmienności odkształceń dla rozluźniania gruntu,

$v(l_0)_z$ - współczynnik zmienności odkształceń dla zagęszczania gruntu,

l_0 - długość standardowej bazy pomiarowej.

We wzorze (9) uwzględniono wzór *Batkiewicza* [7],[9].

W przypadku złączy istniejących rurociągów, znając ich długość efektywną Δl_0 , można wyznaczyć wartość dopuszczalnych średnich odkształceń ϵ_0 ze wzoru [8]:

$$\epsilon_0 = \frac{\Delta l_0}{2l \left(1 + t \frac{\sqrt{v_r^2 + v_z^2}}{2} \sqrt{\frac{l_0}{l}} \right)} \quad (10)$$

gdzie t jest indeksem niezawodności pojedynczego złącza. Losowa odporność złącza na działanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy górotworu ϵ_0 zależy od wartości indeksu niezawodności t , odpowiadającego określonemu prawdopodobieństwu nieuszkodzenia złącza. Przykładowo, w tablicy 2 przedstawiono odporność ϵ_0 istniejącego przewodu, wykonanego z rur o długości $l = 5$ m i średniej długości efektywnej kielicha wynoszącej $\Delta l_0 = 130$ mm w zależności od przyjętej wartości indeksu niezawodności t . Przyjęto długość standardowej bazy pomiarowej $l_0 = 25$ m.

Tablica 2
Odporność złączy rurociągu w zależności od indeksu t

t	$P_i(t)$	ϵ_0 , mm/m
1,1	0,864	9,01
1,645	0,95	7,82
2,0	0,977	7,20
2,5	0,994	6,48
3,2	0,999	5,68
3,7	0,9999	5,22
4,2	0,99999	4,83
5,2	0,9999999	4,20

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 [4], w tym złączy. Do określenia tego prawdopodobieństwa dla odcinka przewodu o z złączach niezbędna jest znajomość rozkładu wartości poziomych odkształceń ϵ na długości rurociągu równej promieniowi zasięgu wpływów głównych lub też ich średniej wartości. Wtedy prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy rozpatrywanego odcinka rurociągu można określić wzorem [4]:

$$P_s(t) = [P_i(t)]^z \quad (11)$$

gdzie:

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

Prawdopodobieństwo wysunięcia końców rur ze złączy w strefie poza ekstremalnymi wartościami odkształceń jest mniejsze od prawdopodobieństwa wysunięcia końców rur ze złączy, znajdujących się w tym samym czasie w strefie największych odkształceń gruntu. Ponadto, im dłuższy odcinek rurociągu, tym niższa średnia wartość odkształceń, jakie mogą oddziaływać na ten odcinek, co wynika z analizy odkształceń dla różnych baz pomiarowych. Wartości współczynników zmienności dla odcinków o długościach porównywalnych i większych od długości standardowej bazy pomiarowej są znacznie niższe od współczynników zmienności, jakie należy uwzględniać przy określaniu niezawodności pojedynczego złącza. 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. Ponieważ dla całego rozpatrywanego odcinka o długości $L_o = zl$ w tej samej chwili mogą wystąpić poziome odkształcenia warstwy gruntu o wartościach, wynikających z uwzględnienia współczynników zmienności dla tego odcinka, proponuje się przy obliczaniu prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy takiego odcinka określenie prawdopodobieństwa $P_i(t)$ dla pojedynczego złącza, opierając się na wartości współczynników zmienności odkształceń odpowiadających długości L_o . Wtedy wartość indeksu niezawodności t_i dla pojedynczego złącza można obliczyć ze wzoru [8]:

$$t_i = t \sqrt{\frac{l_o}{l}} \quad (12)$$

Przyjmując, że liczba złączy objętych oddziaływaniem rozluźniania gruntu rozpatrywanego odcinka dla rur wynosi $z = 20$, prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy odcinka przewodu wyznaczone na podstawie wzoru (11) przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3

Prawdopodobieństwo dla odcinka rurociągu o 20 złączach

t	ε_0 , mm/m	$P_i(t)$	t_i	$P_i(t_i)$	$P_i(t_i)^{20}$
1,100	9,01	0,864	2,460	0,9910	0,835
1,500	8,11	0,933	3,354	0,9995	0,990
1,645	7,82	0,950	3,678	0,9999	0,998

Porównując prawdopodobieństwo rozszczelnienia pojedynczego złącza i odcinka rurociągu złożonego z rur o złączach nasuwkowych lub kielichowych, przedstawione w tablicach 2 i 3, można stwierdzić, że o niezawodności tego rodzaju przewodów decyduje niezawodność pojedynczych złączy.

W zależności od skutków uszkodzenia złączy (np. małe, średnie, duże), a więc ważności przewodu (np. przyłącze, przewód rozdzielczy, przewód tranzytowy), której można przyporządkować odpowiednią wartość indeksu niezawodności t , można określić z danym prawdopodobieństwem ich odporność na działanie poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy gruntu. Miarą tej odporności są dopuszczalne wartości odkształceń ε_0 . Podobną analizę można przeprowadzić w odniesieniu do kompensatorów stosowanych w sieciach wodociągowych.

4. Wnioski

Niezawodność przewodów wodociągowych na terenach górniczych, rozumiana jako prawdopodobieństwo ich bezawaryjnej pracy, ulega obniżeniu. Świadczą o tym wartości wskaźników uszkodzalności przewodów. Poprawa niezawodności wodociągów na terenach górniczych może być realizowana przez ich modernizację i renowację, montaż dodatkowego uzbrojenia, a także budowę nowych przewodów o odpowiedniej odporności na wpływy eksploatacji górniczej.

Przy wyznaczaniu podłużnych sił osiowych oraz przemieszczeń rur wywołanych wpływami eksploatacji górniczej należy uwzględniać rozrzut losowy właściwości gruntu oraz wartości poziomych odkształceń przypowierzchniowej warstwy górotworu. Minimalna długość złączy i kompensatorów powinna być określana z odpowiednim prawdopodobieństwem i z zastosowaniem wartości współczynników zmienności wskaźników deformacji, charakterystycznych dla długości rozpatrywanych odcinków. O niezawodności

przewodu o konstrukcji odcinkowej, stanowiącego obiekt o szeregowej strukturze niezawodnościowej, decyduje niezawodność poszczególnych złączy.

Odporność istniejących przewodów wodociągowych powinna być wyznaczana z określonym prawdopodobieństwem, zależnym od ich ważności w całym systemie wodociągowym.

LITERATURA

1. Biernatowski K.: Fundamentowanie. PWN, Warszawa 1984.
2. Kalisz P.: Probabilistyczna analiza wpływu eksploatacji górniczej na rurociągi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo z. 270. Gliwice 2005, s. 109-118.
3. Kuś K. i inni: Podstawy projektowania układów i obiektów wodociągowych. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1854, Gliwice 1995.
4. Kwietniewski M., Kłoss-Trębaczewicz H., Roman M.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.
5. Kwietniewski M. i in.: Wpływ różnych czynników na uszkodzalność przewodów sieci wodociągowych w świetle eksploatacyjnych badań niezawodności. Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 10, 2002, 366-371.
6. Kwietniewski M., Sudoł M.: Ocena uszkodzalności przewodów tranzytowych w świetle eksploatacyjnych badań niezawodności. Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 9, 2002, 325-329.
7. Kwiatek J. i inni: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. GIG, Katowice 1997.
8. Kwiatek J. i inni: Opracowanie probabilistycznej metody oceny skutków podziemnej eksploatacji górniczej w obiektach budowlanych. Projekt badawczy własny. GIG, Katowice 2006.
9. Kwiatek J.: Obiekty budowlane na terenach górniczych. GIG, Katowice 2002.
10. Mokrosz R.: Wprowadzenie do mechaniki budowy liniowych zagłębionych w gruncie na terenach górniczych. Zakład Narodowy im. Ossolińskich - PAN, Wrocław 1985.
11. Popiołek E.: Rozproszenie statystyczne odkształceń poziomych terenu w świetle geodezyjnych obserwacji skutków eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe AGH Geodezja z. 44, Kraków 1976.
12. Stoch T.: Wpływ warunków geologiczno-górnich eksploatacji złoża na losowość procesu przemieszczeń i deformacji powierzchni terenu. AGH, Kraków 2005 (rozprawa doktorska).
13. Zuber T.: Wpływ eksploatacji górniczej na uszkodzalność sieci wodociągowych i kanalizacyjnych na obszarze wybranych miast Śląska. Gaz, Woda i Technika Sanitarna nr 6, 1999, 207-213.
14. Zych J.: Metoda prognozowania wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu uwzględniająca asymetryczny przebieg procesów deformacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 167, Gliwice 1987.