

JOANNA DULIŃSKA, ANTONI ZIĘBA\*

WPLYW WSTRZĄSÓW GÓRNICZYCH  
I ODSTRZAŁÓW W KAMIENIOŁOMACH  
NA ODPOWIEDŹ DYNAMICZNĄ GAZOCIĄGU

EFFECT OF MINING SHOCKS AND QUARRY SHOOTING  
ON DYNAMIC RESPONSE OF PIPELINE

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obliczeń i analizę odpowiedzi dynamicznej gazociągu zagłębionego w gruncie na nierównomierne wymuszenie parasejsmiczne pochodzące od wstrząsów górniczych i od odstrzałów w kamieniołomie. Przyjęto model propagacji fali wstrząsowej w gruncie, którego parametry zależne są od źródła drgań. Oszacowano wpływ obciążeń kinematycznych na wielkości sił wewnętrznych w konstrukcji gazociągu.

*Słowa kluczowe: dynamika gazociągów, efekt propagacji fali, nierównomierne wymuszenie kinematyczne*

Abstract

The article presents results of calculations and analysis of dynamic response of buried pipeline to nonuniform kinematic excitation arising in pipeline from mining shock and shooting in quarry. Model of nonuniform kinematic excitation was adopted. Parameters of this model depend on source of vibration. The influence of kinematic excitations on dynamic stresses in pipeline was evaluated.

*Keywords: dynamics of pipelines, travelling wave effect, nonuniform kinematic excitation*

\* Dr hab. inż. Joanna Dulińska, dr inż. Antoni Zięba, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

W przypadku obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli o niewielkich wymiarach w rzucie przyjmuje się, że wszystkie punkty podstawy budowli podlegają jednakowemu wymuszeniu kinematycznemu. Założenie takie jest zbyt daleko idącym uproszczeniem w przypadku budowli, których wymiary są porównywalne z długością fali wstrząsowej działającej na nią. Fala wstrząsowa dociera bowiem do poszczególnych punktów podparcia budowli w innym czasie, występuje utrata spójności wynikająca z odbicia i refrakcji fal w różnorodnym podłożu, różne są też warunki gruntowe w poszczególnych punktach podparcia budowli. Powyższe czynniki sprawiają, że należy liczyć się z wystąpieniem różnych wartości amplitud i faz drgań w punktach podparcia budowli, czyli z efektem nierównomiernego wymuszenia kinematycznego [4, 11, 12]. Odpowiedź dynamiczna budowli na nierównomierne wymuszenie kinematyczne, ze względu na pojawienie się efektów quasi-statycznych, może być większa niż odpowiedź na wymuszenie równomierne.

Typowymi obiektami narażonymi na nierównomierne wymuszenie kinematyczne są budowle liniowe, np. gazociągi [1–3, 6, 8, 10]. Znaczącym nierównomiernym obciążeniem kinematycznym dla tego rodzaju budowli liniowych mogą być wstrząsy parasejsmiczne pochodzące od tąpnięć górniczych lub od prac strzałowych w kamieniołomach. Dominujące częstotliwości drgań będących następstwem wstrząsów górniczych znajdują się bowiem w paśmie od 1,0 do 30 Hz, w którym zawierają się zazwyczaj podstawowe częstotliwości drgań własnych konstrukcji. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń odpowiedzi dynamicznej sekcji gazociągu zagłębionego w gruncie o długości 100 m na rzeczywiste, zarejestrowane drgania gruntu pochodzące od wstrząsu górniczego w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM) oraz od prac strzałowych w kamieniołomie Imielin. Wyniki porównano z rezultatami obliczeń odpowiedzi dynamicznej gazociągu na wstrząs górniczy w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), które przedstawione były uprzednio w pracy [3].

## 2. Model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego

W obliczeniach odpowiedzi dynamicznej zagłębionego w gruncie gazociągu na wstrząsy górnicze oraz na wstrząsy będące wynikiem prowadzenia prac strzałowych w kamieniołomach przyjęto model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego zaproponowany w pracy [3]. Założono, że kolejne punkty gruntu położone na kierunku propagacji fali wstrząsowej powtarzają ruch punktu kontrolnego z opóźnieniem, zależnym od prędkości fali w gruncie. Przyjęto również, że następuje redukcja amplitud drgań wraz ze zwiększeniem odległości od źródła. Redukcja ta zależy od rodzaju wymuszenia kinematycznego. Przyjęty model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego jest prosty do zastosowania w praktyce inżynierskiej: wyniki pomiaru ruchu gruntu w jednym punkcie pozwalają na wyznaczenie przebiegu drgań gruntu w dowolnym punkcie.

W przypadku wzbudzenia drgań powierzchni gruntu wstrząsami górniczymi redukcję amplitud drgań wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań wyznaczono na podstawie wzorów empirycznych podających zależność pomiędzy parametrami drgań powierzchni a energią wstrząsu i odległością epicentralną (lub hipocentralną). Prognoza redukcji drgań

jest inna dla różnych regionów, w których występują wstrząsy górnicze (np. GZW, LGOM).

Przykładowo w obszarze LGOM redukcję przyspieszenia wraz ze wzrostem odległości od źródła można wyznaczać z zależności podanych w [9]

$$a(r) = a_e \cdot H(r)$$

$$H(r) = 0,8575 \cdot r^{-1,0098} \quad (1)$$

gdzie:

- $a(r)$  – przyspieszenie drgań w odległości  $r$ ,
- $a_e$  – przyspieszenie drgań w strefie epicentralnej,
- $H(r)$  – funkcja charakteryzująca redukcję drgań poza obszarem epicentralnym,
- $r$  – odległość epicentralna [km].

W przypadku drgań powierzchniowych wywołanych pracami strzałowymi w kamieniołomie do obliczenia współczynnika redukcji drgań wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań zastosowano wzór stosowany do obliczeń redukcji amplitud drgań powierzchni w przypadku wystąpienia tłumienia geometrycznego [5]

$$A_r = A_0 \cdot \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \quad (2)$$

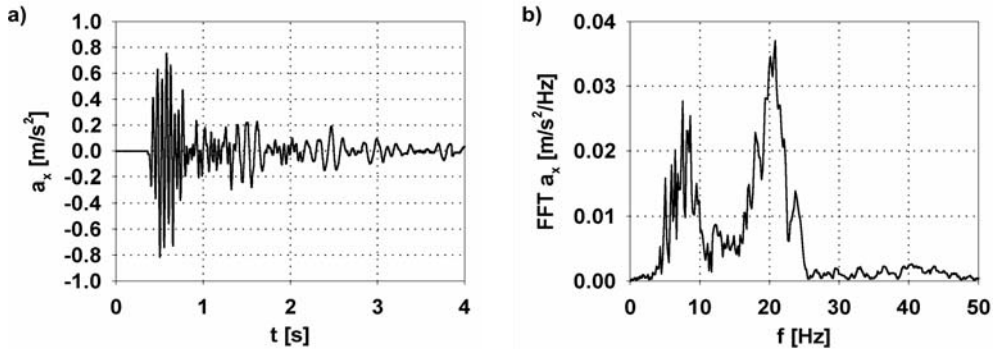
gdzie:

- $A_r$  – amplituda drgań w odległości  $r$  od źródła drgań,
- $A_0$  – amplituda drgań w odległości  $r_0$  od źródła drgań,
- $n = 0,5$  – współczynnik rozbieżności dla fal powierzchniowych Rayleigha.

Weryfikacja doświadczalna proponowanego modelu obliczeniowego gazociągu poddanego nierównomiernemu wymuszeniu kinematycznemu przedstawiona została w pracy [3] i dała pozytywne rezultaty.

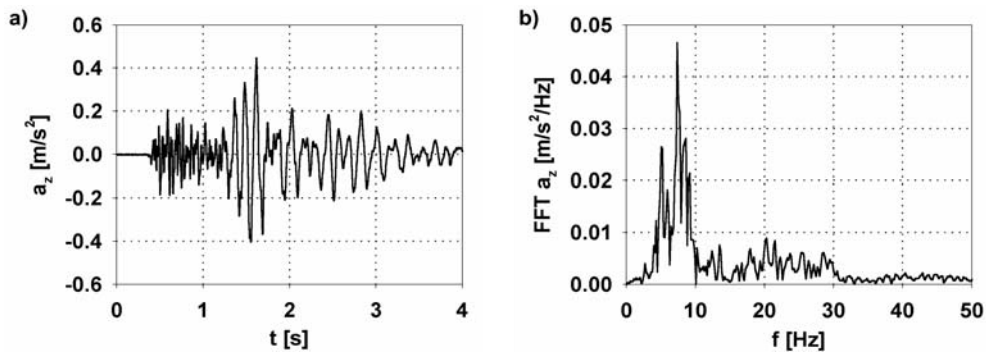
### 3. Charakterystyka drgań pochodzących od wstrząsu górniczego z terenu LGOM i od prac strzałowych w kamieniołomie Imielin

Do obliczeń odpowiedzi dynamicznej gazociągu na wymuszenie kinematyczne pochodzące od wstrząsu górniczego wybrano rzeczywisty przebieg przyspieszeń drgań, zarejestrowany w rejonie LGOM. Na rycinach 1 i 2 przedstawiono przebieg czasowy przyspieszeń drgań odpowiednio w kierunku ( $x$ ) równoległym do kierunku propagacji fali wstrząsowej w podłożu oraz w kierunku pionowym ( $z$ ), a także strukturę częstotliwościową tego przebiegu. Rozważany wstrząs górniczy należał do najintensywniejszych zjawisk dynamicznych zarejestrowanych na terenie LGOM; energia wstrząsu wynosiła  $E = 5 \cdot 10^7$  [J]. W przebiegu drgań w kierunku poziomym dominowały częstotliwości około 7,5–9 i 20 Hz, zaś w kierunku pionowym około 8 Hz.



Ryc. 1. Przyspieszenia drgań gruntu od wstrząsu górniczego na terenie LGOM w kierunku poziomym: a) przebieg czasowy, b) struktura częstotliwościowa

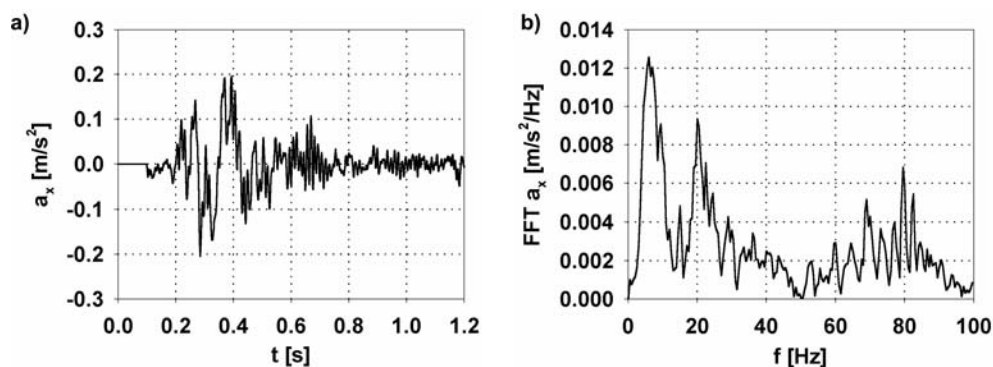
Fig. 1. Accelerations of ground vibrations arising from mining shock in LGOM in horizontal direction: a) time trace, b) frequency spectrum



Ryc. 2. Przyspieszenia drgań gruntu od wstrząsu górniczego na terenie LGOM w kierunku pionowym: a) przebieg czasowy, b) struktura częstotliwościowa

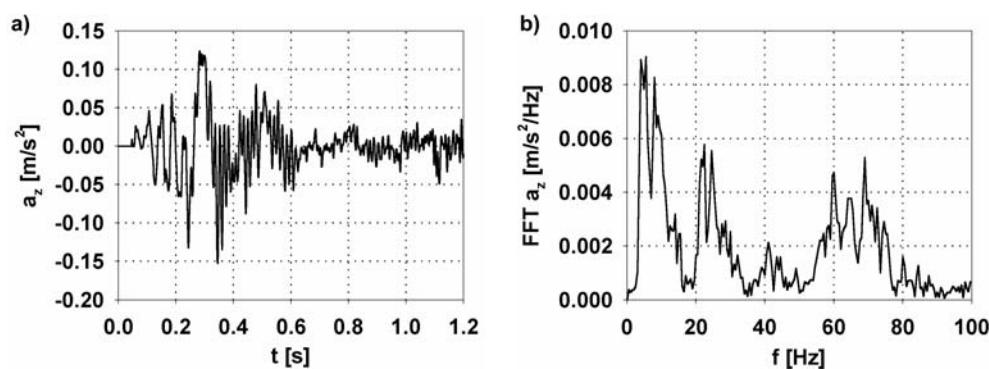
Fig. 2. Accelerations of ground vibrations arising from mining shock in LGOM in vertical direction ( $z$ ): a) time trace, b) frequency spectrum

W celu oszacowanie wpływu odstrzałów powierzchniowych w kamieniołomie na odpowiedź dynamiczną gazociągu w obliczeniach wykorzystano przedstawione na ryc. 3 i 4 przebiegi czasowe przyspieszeń drgań poziomych w kierunku ( $x$ ) równoległym do kierunku propagacji fali wstrząsowej w podłożu oraz w kierunku pionowym ( $z$ ). Zostały one zarejestrowane podczas prowadzenia prac strzałowych w kamieniołomie Imielin. Maksymalne wartości przyspieszeń drgań występują w kierunku propagacji drgań i dochodzą do  $200 \text{ mm/s}^2$ . Spektrum częstotliwościowe ma strukturę rozproszoną. W kierunku propagacji fali dominują częstotliwości 5,5–8 oraz 20–23 Hz. W kierunku pionowym oprócz częstotliwości 5–10 oraz 20–25 Hz występują wyższe składowe w paśmie 60–70 Hz. Częstotliwości drgań są wyższe niż w przypadku drgań pochodzących od wstrząsów górniczych, a czas trwania wstrząsu jest znacznie krótszy.



Ryc. 3. Przyspieszenia drgań gruntu od prac strzałowych w kamieniołomie Imielin w kierunku poziomym: a) przebieg czasowy, b) struktura częstotliwościowa

Fig. 3. Accelerations of ground vibrations arising from shooting in quarry Imielin in horizontal direction: a) time trace, b) frequency spectrum



Ryc. 4. Przyspieszenia drgań gruntu od prac strzałowych w kamieniołomie Imielin w kierunku pionowym: a) przebieg czasowy, b) struktura częstotliwościowa

Fig. 4. Accelerations of ground vibrations arising from shooting in quarry Imielin in vertical direction: a) time trace, b) frequency spectrum

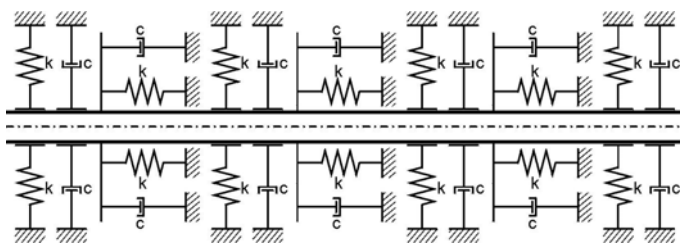
#### 4. Model obliczeniowy gazociągu

Na rycinie 5 przedstawiono model obliczeniowy gazociągu zagłębionego w gruncie. Podobny model obliczeniowy był uprzednio przedstawiony przez autorów w pracy [3]. Jednak ze względu na fakt, że wówczas rozpatrywano propagację fali poprzecznej, posłużono się modelem uwzględniającym jedynie współpracę gruntu z konstrukcją w kierunku pionowym. Obecnie założono sprężystą współpracę konstrukcji z gruntem w kierunku pionowym i poziomym. Przyjęto, że gazociąg zagłębiony jest w gruncie piaszczysto-żwirowym. Charakterystyki sprężyn odpowiadające własnościom takiego podłoża gruntowego obliczono zgodnie z [5]. Założono, że prędkość propagacji fali w gruncie wynosi 230 m/s. Współczynnik tłumienia drgań w gruncie wyznaczono na podstawie [5]

$$c = k \cdot \Phi \quad (3)$$

gdzie:

- $k, c$  – współczynniki sprężystości i tłumienia podłoża gruntowego,
- $\Phi$  – współczynnik charakteryzujący właściwości tłumiące podłoża gruntowego,  $\Phi = 0,002-0,004$  s.



Ryc. 5. Model gazociągu zagłębionego w gruncie

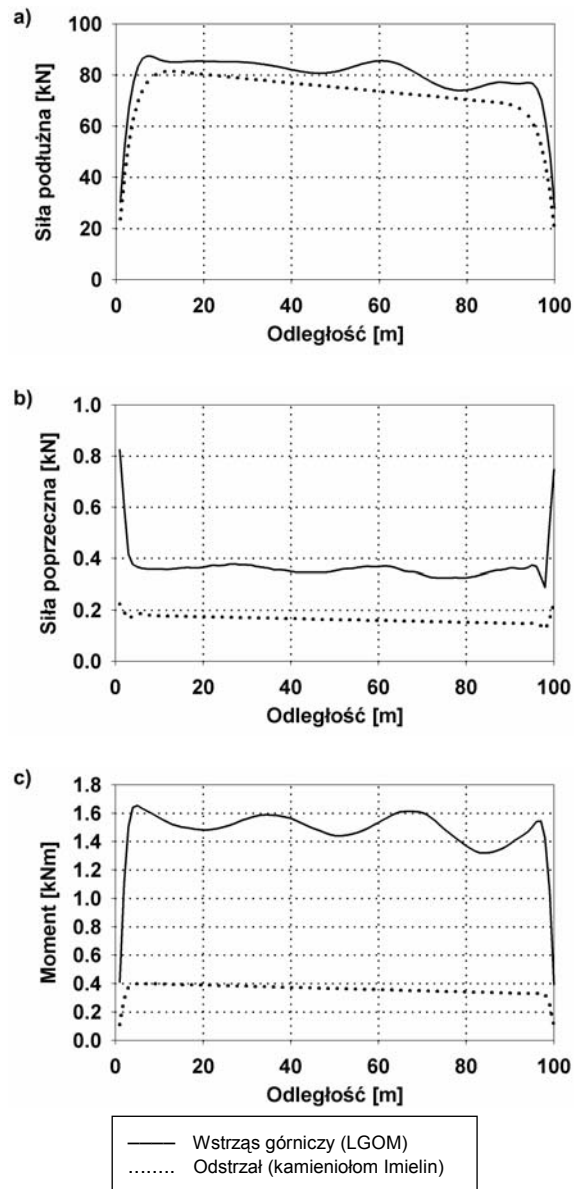
Fig. 5. Model of buried pipeline

Obliczone wartości współczynników sprężystości oraz współczynników tłumienia pozostają w zgodzie z wartościami przedstawianymi przez innych autorów [6, 8, 9]. Podobny model obliczeniowy gazociągu stosowany jest również w obliczeniach statycznych, np. przy szacowaniu wielkości sił wewnętrznych w konstrukcji powstających przy deformacjach terenu w rejonach aktywności górniczej [7]. Inne wartości przyjmują jednak charakterystyki sprężystości gruntów stosowane w obliczeniach statycznych.

### 5. Wpływ wstrząsu górniczego oraz odstrzału w kamieniołomie na odpowiedź dynamiczną gazociągu

Na rycinie 6 przedstawiono obwiednie sił podłużnych, poprzecznych oraz momentów zginających w konstrukcji gazociągu poddanego działaniu nierównomiernego wymuszenia parasejsmicznego pochodzącego od wstrząsu górniczego na terenie LGOM oraz od prac strzałowych w kamieniołomie Imielin. Parametry wymuszenia w dowolnym punkcie wzdłuż gazociągu obliczono, posługując się proponowanym modelem wymuszenia. W zależności od źródła drgań założono zmniejszenie amplitud drgań wraz ze wzrostem odległości od źródła, zgodnie ze wzorami (1) lub (2). Obliczenia wykonano programem ABAQUS.

W wyniku porównania maksymalnych sił wewnętrznych powstałych w odpowiedzi na wstrząsy górnicze w rejonie LGOM oraz na prace strzałowe w kamieniołomie Imielin można stwierdzić, że odpowiedź dynamiczna na wstrząs górniczy jest znacznie większa niż odpowiedź na odstrzał, zwłaszcza w przypadku momentów zginających i sił poprzecznych (por. ryc. 6b, c). Mniejsza różnica w odpowiedzi, mimo znaczącej różnicy w wartościach wymuszenia, występuje w przypadku sił podłużnych (por. ryc. 6a). Może być to spowodowane strukturą częstotliwościową wymuszeń: w sygnale zarejestrowanym w czasie wstrząsu górniczego LGOM pasmo dominujących częstotliwości jest wyższe (por. p. 3) niż pasmo częstotliwości dominujących w sygnale zarejestrowanym w czasie odstrzału w kamieniołomie. W pracy [3], dotyczącej wpływu prędkości propagacji fali wstrząsowej



Ryc. 6. Obwiednie: a) sił podłużnych, b) sił poprzecznych, c) momentów zginających w gazociągu, powstałych w wyniku wstrząsu górniczego w LGOM oraz ostrzału w kamieniołomie Imielin

Fig. 6. Envelopes of: a) axial forces, b) shear forces, c) bending moments in pipeline arising from mining shock in LGOM and shooting in quarry Imielin

w gruncie na odpowiedź dynamiczną budowli liniowych, przedstawiono wyniki obliczeń odpowiedzi gazociągu na wymuszenie z innego terenu aktywności górniczej – Górnoślą-

skiego Zagłębia Węglowego. Wstrząs ten cechowały 3-krotnie mniejsze wartości przyspieszeń drgań niż wstrząs z terenu LGOM, jednak dominujące w sygnale częstotliwości były niższe i zawierały się w paśmie 2,5–5 Hz.

## 6. Wnioski

Porównanie wyników obliczeń odpowiedzi dynamicznej gazociągu na wymuszenia kinematyczne z rejonów LGOM i GZW prowadzi do wniosku, że istotny wpływ na odpowiedź dynamiczną obiektu ma nie tylko wartość przyspieszeń, ale również struktura częstotliwościowa sygnału wymuszenia. Maksymalne siły podłużne i poprzeczne oraz momenty zginające wywołane wstrząsem z terenu GZW wynoszą odpowiednio 400 i 1,2 kN oraz 13 kNm (por. [3]). Siły te są więc kilkakrotnie większe od sił wywołanych wstrząsem w rejonie LGOM. Dzieje się tak, pomimo że maksymalne wartości przyspieszeń podłoża pozostają w innej proporcji. W przypadku bowiem, gdy w przebiegach drgań stanowiących wymuszenie kinematyczne dominujące pasmo częstotliwości jest zbliżone do podstawowych częstotliwości drgań własnych obiektu, wówczas otrzymane wartości maksymalnych sił wewnętrznych mogą być większe od wartości otrzymanych w wyniku działania wymuszeń o większej intensywności, ale o strukturze częstotliwościowej, w której dominujące częstotliwości nie pokrywają się z początkowymi częstotliwościami drgań własnych obiektów.

W celu oszacowania wpływu wstrząsu górniczego z rejonu LGOM oraz odstrzału w kamieniołomie Imielin na pracę gazociągu zagłębianego w gruncie obliczono naprężenia w konstrukcji występujące w czasie trwania wstrząsów. Maksymalne naprężenia spowodowane działaniem wstrząsu górniczego z terenu LGOM i wywołane odstrzałem w kamieniołomie Imielin dochodzą odpowiednio do 3,5 i 2,3 MPa. Naprężenia te nie stanowią więc zagrożenia dla konstrukcji gazociągu. Maksymalne naprężenia w konstrukcji spowodowane działaniem wstrząsu górniczego z terenu GZW wynoszą około 15 MPa, co nie przekracza 10% wytrzymałości stali na rozciąganie. Należy jednak zaznaczyć, że w rejonach aktywności górniczej i prac strzałowych mogą wystąpić wstrząsy o większych wartościach przyspieszeń drgań oraz o innej strukturze częstotliwościowej niż analizowane przebiegi z terenów LGOM, GZW czy z kamieniołomu Imielin, co może spowodować znaczący przyrost naprężeń w konstrukcji.

## Literatura

- [1] Ciesielski R., Dulińska J., Zięba A., *Complex presentation of paraseismic influence on underground pipelines*, Proc. of the International Conference: Geotechnics 97, Slovakia, 1997, 145-147.
- [2] Datta T.K., *Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 192, 1999, 271-284.
- [3] Dulińska J., Zięba A., *Odpowiedź dynamiczna gazociągów na nierównomierne wymuszenie kinematyczne*, Czasopismo Techniczne z. 12-B/2005, Kraków 2005, 3-21.
- [4] Leger P., Idé M.I., Paultre P., *Multiple-support seismic analysis of large structures*, Computer & Structures, Vol. 36, No. 6, 1990, 1153-1158.



- [5] Lipiński J., *Fundamenty pod maszyny*, Warszawa 1985.
- [6] Manolis G.D. [et al.], *Seismic analysis of buried pipeline in a 3D soil continuum*, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 15, 1995, 371-394.
- [7] Mokrosz R., *Wprowadzenie do mechaniki budowli liniowych zagłębionych w gruncie na terenach górniczych*, PAN, Katowice 1985.
- [8] Soliman H.O., Datta T.K., *Response of overground pipelines to random ground motion*, Engineering Structures, Vol. 18, No. 7, 1996, 537-545.
- [9] Tataro T., *Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską, tradycyjną zabudowę mieszkalną*, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria: Inżynieria Lądowa nr 74, Kraków 2002.
- [10] Yong Y., *Response of pipeline structure subjected to ground motion excitation*, Engineering Structures, Vol. 19, No. 8, 1997, 679-684.
- [11] Zembaty Z., *Random vibrations of discrete systems under kinematic wave excitations*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 34, 1996, 159-177.
- [12] Zerva A., *Effect of spatial variability and propagation of seismic ground motions on the response of multiply supported structures*, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 6, No. 3/4, 1991, 212-221.