

Joanna BZÓWKA

Katedra Geotechniki
Politechnika Śląskiej

METODY WYMIAROWANIA KOLUMN INIEKCYJNYCH

Streszczenie. W artykule zostały przedstawione metody wymiarowania kolumn wykonanych techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej. W pracy zostały scharakteryzowane propozycje Żmudzińskiego i Motaka (1995a), Gwizdały i Motaka (1996), Kościka (2006) oraz propozycja oceny nośności z wykorzystaniem wyników badań sondą statyczną CPT (Bustamante, 2002).

THE METHODS OF ESTIMATION OF BEARING CAPACITY OF JET GROUTING COLUMNS

Summary. In the paper the methods used for estimation of bearing capacity of jet grouting columns are presented. The methods are following: Żmudziński & Motak (1995a), Gwizdała & Motak (1996), Kościk (2006) and the method based on the using CPT results (Bustamante, 2002).

1. Wprowadzenie

Wysokociśnieniowa iniekcja strumieniowa (jet grouting) to metoda, która wykorzystuje efekt przecinania i rozdrabniania gruntu pod działaniem strumienia zaczynu cementowego, wpływającego z dyszy, z prędkością ponad 100 m/s, pod ciśnieniem 15÷70 MPa. Cząstki gruntu otoczone zaczynem wypełniają przestrzeń w zasięgu erozyjnego strumienia, a ich nadmiar wypływa na powierzchnię.

W zależności od wymaganej średnicy wzmocnionej, walcowej strefy gruntu i rodzaju podłoża stosuje się trzy odmiany wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej:

- strumień pojedynczy (MONO JET),
- strumień podwójny (DOUBLE JET),
- strumień potrójny (TRIPLE JET).

Powstała w wyniku wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej mieszanina cementu z gruntem rodzimym, zwana cemento-gruntem, uzyskuje po stwardnieniu znaczną wytrzymałość na ściskanie (od około 0,5 MPa - w gruntach organicznych do około 25 MPa - w żwirach), przy równoczesnym zmniejszeniu wartości współczynnika wodoprzepuszczalności o kilka rzędów wielkości (Żmudziński i Motak, 1995b). Wykorzystując technikę jet grouting, uzyskuje się, w przeciwieństwie do iniekcji grawitacyjnej, równomierne rozproszczenie spoiwa lub środka uszczelniającego w gruncie, niezależnie od jego naturalnego uziarnienia, wytrzymałości i występujących w nim spękań. W rezultacie następuje ujednoczenie (homogenizacja) cech gruntu oraz zwiększenie wytrzymałości i szczelności gruntu (Petyniak i Kłosiński, 1994).

Technika wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej charakteryzuje się licznymi zaletami. Bryły cemento-gruntu można wykonywać w dowolnej formie geometrycznej, w wymaganym miejscu w podłożu oraz niemal we wszystkich gruntach. Głównie formuje się kolumny. Inne formy i budowle geotechniczne, to ekrany uszczelniające, ściany z lameli, ściany komórkowe, szczelne palisady itp.

Szczególne zalety techniki jet grouting przydatne są, gdy trzeba wykonać głęboki wykop bardzo blisko istniejącej budowli, gdy brakuje miejsca dla cięższego sprzętu budowlanego lub gdy niedopuszczalne są inne metody ulepszania warunków geotechnicznych, z którymi związane są drgania. Technika wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej zalecana jest do wzmacniania podłoża gruntowego pod nadmiernie osiadającymi obiektami, do wykonywania pionowych i poziomych przesłon wodoszczelnych, do obudowy zewnętrznej tuneli, a także przy projektowaniu posadowień nowych budynków (Bzówka, 2001).

2. Podstawy wymiarowania kolumn iniekcyjnych

2.1. Propozycja Żmudzińskiego i Motaka (1995a)

Metoda wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej jest już dość dobrze znana, jednakże jak zauważa wielu autorów, między innymi Żmudziński i Motak (1995a), nie jest rozpowszechniona w takim stopniu, na jaki zasługuje. Powodem jest tu brak metody oceny nośności kolumn iniekcyjnych w fazie projektowania. Obowiązująca norma palowa PN-83/B-02482, powstała przed rozpowszechnieniem się metody wysokociśnieniowej iniekcji

strumieniowej, zatem nie obejmuje postanowień w zakresie projektowania kolumn realizowanych tą metodą, a ponadto do 1995 roku nie były znane krajowe i zagraniczne publikacje dotyczące tego zagadnienia.

W celu ustalenia wstępnych propozycji oceny obliczeniowej nośności kolumn iniekcyjnych Żmudziński i Motak (1995a) oraz Gwizdała i Motak (1996) oparli się na dotychczasowych wynikach obciążeń próbnych i analizach własnych oraz wykorzystali analogię między tego rodzaju kolumnami a mikropalami iniekcyjnymi.

W propozycjach oceny nośności kolumn iniekcyjnych, opracowanych w ostatnich latach przez polskich autorów, wykorzystuje się podstawowe wzory polskiej normy PN-83/B-02482:

$$Q_r \leq mN, \quad (1)$$

gdzie w przypadku pala wciskanego:

$$N = N_t = S_p q^r A_p + \sum S_{si} t_i^r A_{si}, \quad (2)$$

w odniesieniu do pala wyciąganego:

$$N = N^w = \sum S_{si}^w t_i^r A_{si}. \quad (3)$$

W wyrażeniach (1)-(3)

- Q_r – obliczeniowe obciążenie pala wciskające lub wyciągające,
- m – współczynnik korekcyjny zależny od liczby pali pod fundamentem,
- N_t, N^w – obliczeniowa nośność pala wciskanego lub wyciąganego,
- S_p, S_{si}, S_{si}^w – współczynniki technologiczne, zależne od rodzaju pala i gruntu,
- q^r, t_i^r – jednostkowa obliczeniowa wytrzymałość gruntu pod podstawą lub wzdłuż poboczniczy pala,
- A_p, A_{si} – powierzchnia podstawy lub poboczniczy pala.

Żmudziński i Motak (1995a) na podstawie wyników licznych badań francuskich zalecają stosowanie następujących wzorów:

dla kolumn wciskanych:

$$N_t = 1,1 \sum t_i^r A_{si}, \quad (4)$$

dla kolumn wyciąganych:

$$N^w = \sum t_i^r A_{si}, \quad (5)$$

gdzie:

$t_i^r = \gamma_m t_i^n$ – obliczeniowa wartość jednostkowego oporu tarcia na poboczniczy, oraz przyjmowanie wartości $m=0,7$ w przypadku wciskania i $m=0,65$ w przypadku wyciągania tych kolumn. Wartości charakterystyczne jednostkowego oporu tarcia t^n wzdłuż poboczniczy dla różnych rodzajów gruntów niespoistych i spoistych należy przyjmować według tablic 1 i 2 (Żmudziński i Motak, 1995a). Wartości te są od 1,3 do 2,6 razy (średnio około 1,9 razy) większe niż w normie palowej (PN-83/B-02482) dla pali nieiniekcyjnych.

2.2. Propozycja Gwizdały i Motaka (1996)

Nieco odmienną propozycję oceny nośności wciskanych kolumn iniekcyjnych przedstawili na podstawie własnych badań pięciu kolumn Gwizdała i Motak (1996), proponując stosowanie następującego wzoru dla obiektów wciskanych:

$$N_i = q^r A_p + \Sigma t_i^r A_{si}, \quad (6)$$

gdzie:

$q^r = \gamma_m q^n$ – obliczeniowa wartość jednostkowego oporu gruntu pod podstawą kolumny, kPa,

q^n – wartość jednostkowego oporu pod podstawą kolumny, z uwzględnieniem zagłębienia podstawy kolumny, kPa,

$\gamma_m \leq 0.9$ – współczynnik materiałowy, $\gamma_m = \gamma_m(I_L)$ według PN-81/B-03020,

oraz przyjmowanie wartości współczynnika korekcyjnego $m=0,7$ i współczynników technologicznych $S_p = S_{si} = 1,0$. Autorzy zalecają przyjmowanie we wzorze (6) wartości q^n według normy palowej (PN-83/B-02482) jak dla pali nieiniekcyjnych (tabl. 3 i 4), a wartości t^n jak dla kolumn iniekcyjnych według Żmudzińskiego i Motaka (tabl. 1 i 2), (Zadroga, 2000).

Tablica 1

Wartości charakterystyczne jednostkowego oporu tarcia t^n [kPa] na poboczniczy kolumn iniekcyjnych w gruntach niespoistych (zależne od stopnia zagęszczenia gruntu I_D) (Żmudziński i Motak, 1996)

Rodzaj gruntu	t^n [kPa] $I_D=0.20$	t^n [kPa] $I_D=0.33$	t^n [kPa] $I_D=0.52$	t^n [kPa] $I_D=0.67$	t^n [kPa] $I_D=0.80$	t^n [kPa] $I_D=0.90$
Żwirry, pospółki	60	83	115	140	163	180
Piaski grube i średnie	50	72	105	130	153	160
Piaski drobne i pylaste	45	60	82	100	114	125

Tablica 2

Wartości charakterystyczne jednostkowego oporu tarcia t^n [kPa]
na poboczniczy kolumn iniekcyjnych w gruntach spoistych (zależne od stopnia
plastyczności gruntu I_L) (Żmudziński i Motak, 1996)

Rodzaj gruntu	t^n [kPa] $I_L < 0$	t^n [kPa] $I_L = 0$	t^n [kPa] $I_L = 0.25$	t^n [kPa] $I_L = 0.50$	t^n [kPa] $I_L = 0.65$	t^n [kPa] $I_L = 0.75$
Gliny, piaski gliniaste	135	110	80	50	30	18
Gliny zwięzłe, ily (niepęczniejące)	125	100	70	40	25	14
Pyły, pyły piaszczyste	110	85	75	35	20	9

Tablica 3

Wartości jednostkowego granicznego oporu gruntu pod podstawą pała q^n [kPa]
dla gruntów niespoistych (zależne od stopnia zagęszczenia I_D) (PN-83/B-02482)

Rodzaj gruntu	q^n [kPa] $I_D = 1.00$	q^n [kPa] $I_D = 0.67$	q^n [kPa] $I_D = 0.33$	q^n [kPa] $I_D = 0.20$
Żwir, pospółka	7750	5100	3000	1950
Piasek gruby i średni	5850	3600	2150	1450
Piasek drobny	4100	2700	1650	1050
Piasek pylasty	3350	2100	1150	700

Tablica 4

Wartości jednostkowego granicznego oporu gruntu pod podstawą pała q^n [kPa]
dla gruntów spoistych (zależne od stopnia plastyczności I_L) (PN-83/B-02482)

Rodzaj gruntu	q^n [kPa] $I_L < 0$	q^n [kPa] $I_L = 0$	q^n [kPa] $I_L = 0.50$	q^n [kPa] $I_L = 0.75$
Żwir gliniasty, pospółka gliniasta	4150	2750	1650	850
Piasek gliniasty, glina piaszczysta, glina, glina pylasta	2750	1950	850	450
Glina piaszczysta zwięzła, glina zwięzła, glina pylasta zwięzła, ił piaszczysty, ił, ił pylasty	2800	1950	800	400
Pył piaszczysty, pył	1850	1250	500	250

2.3. Ocena nośności kolumn iniekcyjnych z wykorzystaniem wyników badań sondą statyczną CPT

Badania gruntu *in situ* są niezwykle istotnym narzędziem w projektowaniu posadowień na palach. Sondy wbijane, presjomety, dylatometry oraz sondy statyczne pozwalają na ocenę nośności pali bez konieczności pobierania próbek gruntu w czasie badań geologicznych. Pozwalają one określić profil gruntowy bez naruszania struktury gruntu, a tym samym umożliwiają ocenę parametrów jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistych.

Spośród badań *in situ*, sondowania CPT (CPTu) charakteryzują się największą liczbą zastosowań do oceny nośności pali. Popularnością dorównują im jedynie badania presjometryczne, które na szeroką skalę wykorzystywane są praktycznie tylko we Francji.

Sondę statyczną można z powodzeniem stosować do wyznaczania nośności pali, gdyż można ją z pewnym przybliżeniem traktować jako model pala obciążanego w sposób ciągły.

Bustamante (1994, 2002) na podstawie wyników badań własnych oraz badań wykonanych przez inne zespoły, przeprowadzonych na kolumnach iniekcyjnych w pełni oprzyrządowanych, w pełnej skali technicznej, zaproponował metodę wyznaczania nośności kolumn iniekcyjnych z zastosowaniem wyników sondowań statycznych CPT.

Według propozycji Bustamante obciążenie dopuszczalne pojedynczej kolumny iniekcyjnej obciążonej siłą pionową określa się ze wzoru:

$$Q_0 = \frac{Q_{u,P}}{F_{j,P}} + \frac{Q_{u,S}}{F_{j,S}}, \quad (7)$$

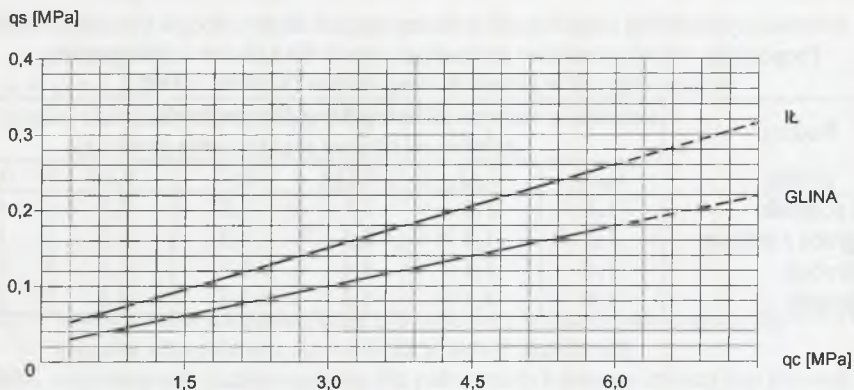
gdzie:

$$Q_{u,P} = S_p k_S C_S, \quad (8a)$$

$$Q_{u,S} = \Sigma \pi D_i l_i q_{si}, \quad (8b)$$

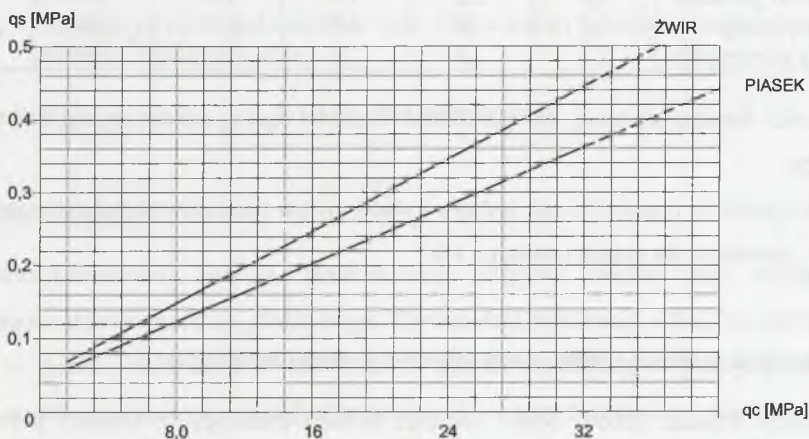
oraz:

- Q_0 – dopuszczalne obciążenie kolumny iniekcyjnej, kN,
- $Q_{u,P}$ – nośność podstawy kolumny iniekcyjnej, kN,
- $Q_{u,S}$ – nośność pobocznic kolumny iniekcyjnej, kN,
- $F_{j,P}$ – współczynnik bezpieczeństwa dla nośności w podstawie kolumny iniekcyjnej ($F_{j,P}=2$),
- $F_{j,S}$ – współczynnik bezpieczeństwa dla nośności pobocznic kolumny iniekcyjnej ($F_{j,S}= 2 \div 3$),
- k_S – bezwymiarowy współczynnik technologiczny zależny od rodzaju gruntu ($k_S=0,4 \div 0,6$ dla glin, $k_S=0,3 \div 0,5$ dla ilów, $k_S=0,15 \div 0,3$ dla piasków, $k_S=0,25$ dla żwirów),
- S_p – pole przekroju podstawy kolumny iniekcyjnej, m²,
- C_S – opór gruntu pod podstawą kolumny iniekcyjnej określany na podstawie sondowania CPT, MPa,
- D_i – średnica kolumny iniekcyjnej, m,
- l_i – długość kolumny iniekcyjnej, m,
- q_{si} – jednostkowy opór gruntu wzdłuż pobocznic kolumny iniekcyjnej, MPa (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Wartości jednostkowych oporów gruntów spoiwystych wzdłuż pobocznic kolumny iniekcyjnej w zależności od wyników sondowań CPT (Bustamante, 2002)

Fig. 1. Values of unit friction resistance along the shaft of the jet grouting column in cohesive soils, dependent on the CPT results (Bustamante, 2002)



Rys. 2. Wartości jednostkowych oporów gruntów niespoistych wzdłuż pobocznic kolumny iniekcyjnej w zależności od wyników sondowań CPT (Bustamante, 2002)

Fig. 2. Values of unit friction resistance along the shaft of the jet grouting column in non-cohesive soils, dependent on the CPT results (Bustamante, 2002)

2.4. Propozycja Kościka (2006) przyjmowania wartości oporów tarcia na pobocznic kolumn iniekcyjnych

Na podstawie przeprowadzonych badań nośności kolumn iniekcyjnych oraz obliczeń Kościk (2006) proponuje przyjmowanie wartości oporów tarcia na pobocznic, zgodnie z PN-83/B-02482 powiększone o odpowiednie współczynniki technologiczne (por. tablice 5 i 6).

Tablica 5

Propozycja współczynników technologicznych dla kolumn iniekcyjnych wykonywanych w gruntach niespoistych (Kościk, 2006)

Rodzaj gruntu	Wartości współczynnika S_s zależne od stopnia zagęszczenia gruntu I_D					
	0,20	0,33	0,52	0,67	0,80	0,90
Żwiry i pospółki	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Piaski grube i średnie	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1
Piaski drobne	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2
Piaski pylaste	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4

Tablica 6

Propozycja współczynników technologicznych dla kolumn iniekcyjnych wykonywanych w gruntach spoistych (Kościk, 2006)

Rodzaj gruntu	Wartości współczynnika S_s zależne od stopnia plastyczności gruntu I_L					
	< 0	0	0,25	0,50	0,65	0,75
Gliny, piaski gliniaste	1,4	2,2	1,9	1,6	1,4	1,3
Gliny zwięzłe, iły	1,3	2,0	1,8	1,5	1,4	1,3
Pyły, pyły piaszczyste	1,7	2,8	2,4	2,1	1,9	1,7

Wielkości współczynnika S_s dla pośrednich wartości I_D i I_L należy wyznaczać poprzez interpolację.

Współczynnik S_p niezależnie od rodzaju i stanu gruntu niespoistego należy przyjmować równy 1,1, natomiast dla gruntu spoistego 1,0.

2.5. Propozycja Kościka (2006) oceny nośności kolumn iniekcyjnych

Propozycja Kościka (2006) oceny nośności kolumn iniekcyjnych dotyczy pojedynczej kolumny wciskanej, o średnicy ϕ 400+1000 mm, obciążonej siłą statyczną, działającą wzdłuż jej osi.

Obliczeniową nośność kolumny iniekcyjnej należy wyznaczać ze wzoru:

$$R_{c,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s}, \quad (9)$$

gdzie:

$R_{c,d}$ – obliczeniowa nośność kolumny iniekcyjnej, kN,

$R_{b,k}$ – charakterystyczna nośność podłoża w podstawie kolumny iniekcyjnej, kN,

$R_{s,k}$ – charakterystyczna nośność gruntu wzdłuż pobocznic kolumny iniekcyjnej, kN,

γ_b – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla nośności w podstawie kolumny iniekcyjnej,

γ_s – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla nośności pobocznic kolumny iniekcyjnej,

$$\gamma_b = \gamma_s = 1,25.$$

Wartości charakterystyczne $R_{b;k}$ i $R_{s;k}$ można uzyskać z obliczeń:

$$R_{b;k} = S_p A_p q_{bk}, \quad (10)$$

$$R_{s;k} = \sum S_{si} \pi D_i l_i q_{ski}, \quad (11)$$

gdzie:

S_p – współczynnik technologiczny dla podstawy kolumny iniekcyjnej, ($S_p = 1,1$ dla gruntów niespoistych, $S_p = 1,0$ dla gruntów spoistych),

S_{si} – współczynnik technologiczny dla pobocznic kolumny iniekcyjnej dla i-tej warstwy gruntu,

A_p – pole podstawy kolumny iniekcyjnej, m^2 ,

D_i – średnica kolumny iniekcyjnej w i-tej warstwie gruntowej, m,

l_i – długość kolumny iniekcyjnej w i-tej warstwie gruntowej, m,

q_{bk} – charakterystyczny jednostkowy opór gruntu pod podstawą kolumny iniekcyjnej, kPa,

q_{ski} – charakterystyczny jednostkowy opór i-tej warstwy gruntowej na pobocznic kolumny iniekcyjnej, kPa.

Wartości q_{bk} i q_{ski} można przyjmować z PN-83/B-02482 - $q_{bk} \equiv q^n$ i $q_{ski} \equiv t^n$.

3. Podsumowanie

Wysokociśnieniowa iniekcja strumieniowa odgrywa ważną rolę wśród metod wzmacniania słabego podłoża gruntowego. Trudno dziś wyobrazić sobie, że zabrakłoby tej metody w geoinżynierii. Szansą na coraz to szersze wdrażanie w praktykę inżynierską techniki wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej jest rozwój metod wymiarowania kolumn iniekcyjnych. W pracy zostały przedstawione dotychczasowe propozycje wymiarowania kolumn iniekcyjnych. Inżynierowie - geotechnicy oczekują na wprowadzenie poprawek do normy palowej PN-83/B-02482, które obejmą metody wymiarowania pali nowej generacji, w tym również kolumn iniekcyjnych.

Literatura

1. Bustamante M., Gianceselli L.: Nośność pionowa wiązki słupów formowanych w gruncie metodą iniekcji strumieniowej. Inżynieria i Budownictwo, nr 8, 1994.
2. Bustamante M.: Les colonnes de jet grouting: dimensionnement et controle. Seminaire Franco – Tunisien: Pathologie des sols et des foundations. Hammamet 2002.

3. Bzówka J.: Obliczeniowy model pala wykonanego techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej (jet-grouting). Praca doktorska, Gliwice 2001.
4. Gwizdała K., Motak E.: Ocena krzywej osiadania wysokociśnieniowych pali iniekcyjnych. XLII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, Krynica 1996, t.7, 45-52.
5. Kościak P.: Analiza nośności i osiadań pali wykonywanych technologią iniekcji strumieniowej, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2006.
6. Petyniak D., Kłosiński B.: Vademecum bieżącego utrzymania i odnowy drogowych obiektów mostowych, t.2: Fundamenty i podpory, Rozdz. 2.4: Wzmacnianie fundamentów mikrofalami, GDDP, Warszawa 1994.
7. PN-81/B-03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
8. PN-83/B-02482: Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
9. Zadroga B.: Czy i jak zmodyfikować Polską Normę Palową PN-83/B-02482? Inżynierska Morska i Geotechnika, nr 2, 2000, 75-81.
10. Żmudziński Z., Motak E.: Ocena obliczeniowa nośności pali wykonywanych metodą wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej. Problemy Naukowo – Badawcze Konstrukcji Inżynierskich, Sesja Naukowa z okazji 70-lecia urodzin Prof. R. Ciesielskiego, Monografia 194, Kraków 1995a, 351-362.
11. Żmudziński Z., Motak E.: Zastosowanie wysokociśnieniowych pali iniekcyjnych w fundamentowaniu budowli, XLI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, Krynica 1995b, t.8, 159-166.

Recenzent: Dr hab. inż. Anna Siemińska – Lewandowska, prof. Pol. Warszawskiej