

**Władysław Duliński\*, Czesława Ewa Ropa\***

## **ANALIZA RÓWNAŃ PRZEPIYU DLA USTALENIA ODLEGŁOŚCI POMIĘDZY TŁOCZNIAMI NA TRASIE GAZOCIĄGU WYSOKOPRĘŻNEGO**

### **1. WSTĘP**

System przesyłowy gazu ziemnego składa się z części liniowej, tj. gazociągu magistralnego, stacji rozdzielczo-pomiarowych, stacji redukcyjnych pierwszego i drugiego stopnia oraz tłoczni gazu. Elastyczność systemu przesyłowego gazu zwiększają podziemne magazyny gazu. Współpracę podziemnego magazynu gazu w pełnym zakresie z systemem przesyłowym umożliwiają tłocznie gazu, które są elementem łączącym te dwa układy i mogą pracować w obu kierunkach.

Na skutek tarcia wewnętrznego w strumieniu przepływającego gazu oraz tarcia o ścianki gazociągu następuje spadek ciśnienia na jego trasie. Zadaniem tłoczni jest zatem kompensacja strat ciśnienia gazu spowodowanych oporami przepływu. Istotnym zagadnieniem przy projektowaniu tłoczni gazu jest ustalenie dopuszczalnego spadku ciśnienia przed tłoczną. Niekorzystne jest stosowanie dużych spadków ciśnień, gdyż sprężanie gazu z niskich ciśnień wymaga większego wkładu energii oraz dużych gabarytów urządzeń kompresorowych, co wiąże się ze znacznie większymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi.

W przypadku gdy istnieje potrzeba transportowania gazu na większe odległości, zachodzi konieczność wielokrotnego sprężania gazu wzdłuż trasy gazociągu wysokoprężnego. Odpowiednia lokalizacja tłoczni pozwala na dostarczanie gazu do odbiorców w określonych ilościach i o wymaganych ciśnieniach na dowolne odległości, efektywne obciążenie gazociągu oraz obniżenie kosztów przesyłu gazu.

### **2. PODZIAŁ I LOKALIZACJA TŁOCZNI GAZU**

Tłocznie gazu, w zależności od zadań, jakie powinny spełniać w systemie gazowniczym, dzieli się na:

- złożowe budowane w pobliżu wydobycia gazu,
- przesyłowe pośrednie budowane wzdłuż trasy gazociągów magistralnych.

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

Tłocznie złożowe stosuje się w przypadku zbyt niskiego ciśnienia złożowego gazu lub w razie obniżania się ciśnienia złożowego, na skutek długotrwałej eksploatacji złoża, do poziomu niewystarczającego dla dostawy gazu do systemu przesyłowego. Tłocznie tego typu mają zatem na celu sprężanie gazu do ciśnienia umożliwiającego jego dalszy transport systemem przesyłowym i muszą być przystosowane do warunków pracy, zmieniających się na skutek sukcesywnego spadku ciśnienia i zmniejszania się wydajności złoża.

Tłocznie przesyłowe pośrednie buduje się wzdłuż trasy gazociągów przesyłowych o dużej długości w przypadku, gdy ciśnienie złożowe gazu, lub ciśnienie wytworzone w tłoczni złożowej, nie wystarcza do przetłoczenia gazu gazociągiem dalekosiężnym. Liczbę tłoczni, odległości między nimi oraz moc zainstalowanych sprężarek dobiera się na podstawie wartości ciśnienia maksymalnego oraz maksymalnego spadku ciśnienia.

Tłocznie gazu rozmieszczone są wzdłuż trasy gazociągu dalekosiężnego zazwyczaj w regularnych odstępach wynoszących od kilkudziesięciu do kilkuset kilometrów (80÷200 km). Praca układu przesyłowego przy nadmiernym spadku ciśnienia na odcinkach gazociągu pomiędzy sąsiednimi tłoczniami jest nieekonomiczna, gdyż powoduje zwiększenie zużycia energii do sprężania gazu i wyższe koszty inwestycyjne. W związku z tym w praktyce stosuje się zwykle stosunek sprężania  $\varepsilon = P_1/P_2 = 1,5 \div 1,8$ . Obecnie istnieje tendencja do obniżania tej wartości, nawet do  $\varepsilon = 1,25$  i przyjmowania odległości pomiędzy sąsiednimi tłoczniami w pobliżu dolnej granicy tego stosunku, w celu zwiększenia przepustowości gazociągów przy mniejszych średnicach [1, 5].

System przesyłowy gazu pracuje najlepiej, jeżeli odległości pomiędzy sąsiednimi tłoczniami są w przybliżeniu równe połowie krytycznej długości gazociągu. Długość krytyczna gazociągu ( $L_{kr}$ ) jest to teoretyczna długość gazociągu, dla której ciśnienie na jego końcu jest równe zero. Można ją obliczyć, przekształcając równania przepustowości gazociągów w rozwiązaniu na  $L$ .

Optymalna odległość między sąsiednimi tłoczniami może być określona jako  $L = 0,5L_{kr}$  oraz poprzez przyjęcie odpowiedniego stosunku sprężania na drodze obliczeniowej lub też z krzywej spadku ciśnienia wzdłuż trasy gazociągu.

Dla wykreślenia krzywej spadku ciśnienia wzdłuż trasy gazociągu wysokoprężnego korzysta się z równania na określenie ciśnienia w dowolnym miejscu gazociągu w postaci

$$P_x = \sqrt{P_1^2 - \frac{L_x}{L}(P_1^2 - P_2^2)} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

gdzie:

$P_1$  – ciśnienie na początku gazociągu, Pa,

$P_2$  – ciśnienie na końcu gazociągu, Pa,

$P_x$  – ciśnienie w dowolnym miejscu gazociągu, Pa,

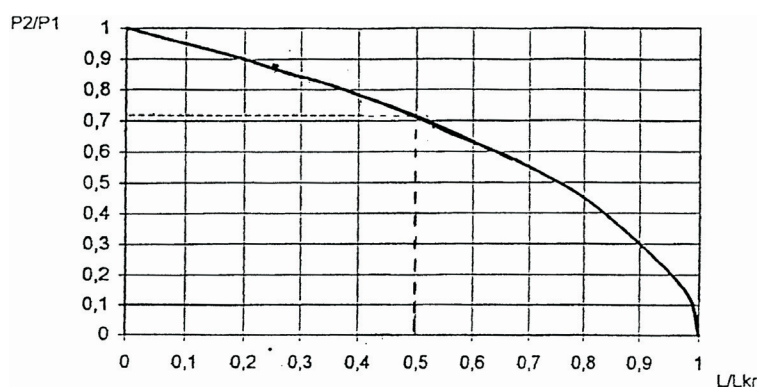
$L_x$  – cząstkowa długość gazociągu, m,

$L$  – całkowita długość gazociągu, m.

Po założeniu we wzorze (1), że  $L = L_{kr}$ , na którego końcu  $P_2 = 0$  i ciśnienie odpowiadające tej długości  $P_x = P_2$ , otrzymano

$$\frac{P_2}{P_1} = \sqrt{1 - \frac{L}{L_{kr}}} \quad (2)$$

Równanie (2) przedstawia uogólnioną charakterystykę dowolnego gazociągu średniego lub wysokiego ciśnienia i wyraża prawo zmiany ciśnienia wzdłuż gazociągu. Wstawiając za  $L/L_{kr}$  wartości w granicach od 0 do 1, otrzymuje się krzywą o bezwymiarowych współrzędnych, przedstawiającą zmianę ciśnienia gazu wzdłuż trasy gazociągu, jak pokazano na rysunku 1 [3].



Rys. 1. Wykres spadku ciśnienia w gazociągu wysokoprężnym

Z przebiegu krzywej wynika, że na części trasy gazociągu o długości odpowiadającej  $L/L_{kr} = 0,75$  ciśnienie spada liniowo, tracąc prawie połowę wartości ciśnienia początkowego  $P_1$ , natomiast na odcinku odpowiadającym  $L/L_{kr} > 0,75$  spada bardzo szybko pozostała część ciśnienia, przy czym spadek ten ma zupełnie inny charakter. Mając obliczoną długość krytyczną gazociągu  $L_{kr}$  dla założonego stosunku  $P_2/P_1$ , można wyznaczyć odległość między tłoczniami.

### 3. ANALIZA RÓWNAŃ DLA OKREŚLENIA ODLEGŁOŚCI MIĘDZY TŁOZNIAMI GAZU

W praktyce gazowniczej istnieje szereg równań dla obliczania oporów przepływu gazu w gazociągach wysokiego ciśnienia. Rozwiązanie tych równań ze względu na długość gazociągu pozwala, przy założeniu odpowiedniego stosunku sprężania lub obliczenia długości krytycznej, na określenie odległości pomiędzy poszczególnymi tłoczniami na trasie gazociągu [2, 4, 8, 9, 10].

Podstawowym równaniem dla obliczania oporów przepływu czystego gazu w gazociągach dalekosiężnych hydraulicznie gładkich jest równanie wyprowadzone na drodze

teoretycznej, znane pod nazwą energetycznego równania Jacoba, które po wprowadzeniu stałych przyjmuje postać

$$Q_n = 0,0358518 \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2) D^5}{\lambda s_g z T L}} \left[ \frac{\text{m}_n^3}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

gdzie:

- $P_1$  – ciśnienie na początku gazociągu, Pa,
- $P_2$  – ciśnienie na końcu gazociągu, Pa,
- $D$  – wewnętrzna średnica gazociągu, m,
- $Q_n$  – wydatek objętościowy gazu w warunkach normalnych,  $\text{m}_n^3/\text{s}$ ,
- $\lambda$  – współczynnik liniowego oporu przepływu,
- $s_g$  – gęstość względna gazu,
- $z$  – współczynnik ściśliwości gazu,
- $T$  – średnia temperatura gazu w gazociągu, K,
- $L$  – długość gazociągu, m.

W dalszej kolejności obliczenia wykonywane zostaną po przekształceniu tego równania do postaci

$$L = \frac{(P_1^2 - P_2^2)(0,0358518)^2 D^5}{Q_n^2 \lambda s_g z T} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

Dla przeprowadzenia analizy zastosowane zostaną również wybrane równania do obliczania spadków ciśnień w gazociągach rzeczywistych (z chropowatością).

W krajach anglosaskich najczęściej do obliczeń hydraulicznych gazociągów rzeczywistych stosowane jest równanie Panhandle'a. Wielu autorów podaje empiryczne równania na obliczenie współczynnika liniowego oporu przepływu  $\lambda$ . Inżynierowie firmy Pipe Line Company (USA), na podstawie doświadczeń praktycznych, określają to równanie jako funkcję liczby Reynoldsa, dla zakresu  $10^4 < Re < 10^7$ , w postaci

$$\lambda = 0,085 \text{Re}^{-0,1461} \quad (5)$$

Po wprowadzeniu do wzoru (5) równania ciągłości oraz wartości stałych za gęstość i lepkość gazu, otrzymano

$$\lambda = 0,0148 \left( \frac{D^{0,1461}}{Q_n^{0,1461} s_g^{0,1461}} \right) \quad (6)$$

Uwzględniając powyższy wzór w równaniu energetycznym Jacoba (3) otrzymano zależność określającą wydatek dla izotermicznego i ustalonego przepływu gazu w gazociągu poziomym

$$Q_n = 0,246489 \left( \frac{P_1^2 - P_2^2}{z T L s_g^{0,8539}} \right)^{0,5394} D^{2,6182} \left[ \frac{\text{m}_n^3}{\text{s}} \right] \quad (7)$$

Równanie to w rozwiązaniu na szukaną długość  $L$  przyjmuje postać

$$L = \frac{(P_1^2 - P_2^2) D^{4,8539}}{13,414 Q_n^{1,8539} s_g^{0,8539} zT} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

W przemyśle francuskim, a także w Polsce, do obliczeń w gazociągach niskiego, średniego i wysokiego ciśnienia stosowane są równania Renouarda. Na drodze obliczeń teoretycznych i prac eksperymentalnych Renouard podaje wzór do obliczenia liczby oporu przepływu, dla zakresu liczby Reynoldsa:  $2 \cdot 10^4 < \text{Re} < 2 \cdot 10^6$ , w postaci

$$\lambda = 0,172 \text{Re}^{-0,18} \quad (9)$$

Po wprowadzeniu stałych i podstawieniu do równania teoretycznego (3) otrzymano

$$Q_n = 0,199098 \left( \frac{P_1^2 - P_2^2}{zTLs_g} \right)^{0,5494} D^{2,6481} \left[ \frac{\text{m}_n^3}{\text{s}} \right] \quad (10)$$

Równanie (10) przekształcone ze względu na  $L$  ma postać

$$L = \frac{(P_1^2 - P_2^2) D^{4,82}}{18,872 Q_n^{1,82} s_g zT} \quad [\text{m}] \quad (11)$$

Na podstawie badań doświadczalnych w gazociągach dalekosieżnych, prowadzonych przez H. Waldena, otrzymano empiryczną zależność na współczynnik liniowego oporu przepływu, dla zakresu liczby Reynoldsa:  $2 \cdot 10^5 < \text{Re} < 2 \cdot 10^7$ , w postaci

$$\lambda = 0,148 \text{Re}^{-0,17} \quad (12)$$

Po wprowadzeniu stałych i podstawieniu do wzoru (3) otrzymano równanie na wydatek objętościowy w postaci

$$Q_n = 0,198655 \left( \frac{P_1^2 - P_2^2}{zTLs_g^{0,835}} \right)^{0,545} D^{2,635} \left[ \frac{\text{m}_n^3}{\text{s}} \right] \quad (13)$$

które w rozwiązaniu na szukane  $L$  ma postać

$$L = \frac{(P_1^2 - P_2^2) D^{4,835}}{19,408 Q_n^{1,835} s_g^{0,835} zT} \quad [\text{m}] \quad (14)$$

W byłym Związku Radzieckim, w Instytucie Gazownictwa WNII-Gaz, opracowano równanie dla obliczenia współczynnika oporu liniowego przepływu, dla zakresu liczby Reynoldsa:  $8 \cdot 10^5 < \text{Re} < 4,2 \cdot 10^6$ , w postaci

$$\lambda = 0,224 \text{Re}^{-0,185} \quad (15)$$

Po uwzględnieniu tej zależności w ogólnym równaniu (3) otrzymano

$$Q_n = 0,185125 \left( \frac{P_1^2 - P_2^2}{zTLs_g} \right)^{0,551} D^{2,653} \left[ \frac{\text{m}_n^3}{\text{s}} \right] \quad (16)$$

Równanie (16) w rozwiązaniu na  $L$  ma postać

$$L = \frac{(P_1^2 - P_2^2) D^{4,815}}{21,357 Q_n^{1,815} s_g^{0,815} zT} \quad [\text{m}] \quad (17)$$

Na podstawie danych doświadczalnych w Stanach Zjednoczonych, w Instytucie Technologii Gazu, określono współczynnik liniowego oporu przepływu, dla zakresu liczby Reynoldsa  $6 \cdot 10^4 < \text{Re} < 2 \cdot 10^7$ , równaniem empirycznym w postaci

$$\lambda = 0,1547 \text{Re}^{-0,182} \quad (18)$$

Po podstawieniu wartości stałych za gęstość, lepkość oraz wyeliminowanie prędkości gazu poprzez wydatek i przekrój gazociągu, otrzymano równanie na wydatek objętościowy w postaci

$$Q_n = 0,192926 \left( \frac{P_1^2 - P_2^2}{zTLs_g^{0,818}} \right)^{0,55} D^{2,650} \left[ \frac{\text{m}_n^3}{\text{s}} \right] \quad (19)$$

Równanie (19) przekształcone do celów obliczeniowych na  $L$  ma postać

$$L = \frac{(P_1^2 - P_2^2) D^{4,818}}{19,414 Q_n^{1,818} s_g^{0,818} zT} \quad [\text{m}] \quad (20)$$

Dla gazociągu, o określonej długości i wymaganej przepustowości, ustala się optymalne parametry układu przesyłowego, tj. średnicę gazociągu, liczbę tłoczni pośrednich i odległości między nimi, stosunek sprężania, ciśnienie wlotowe i wylotowe z tłoczni [3, 7].

Korzystając z podanych wyżej równań, przeprowadzono obliczenia dla konkretnego gazociągu wysokoprężnego o średnicy  $DN = 400$  mm, którym przepływa gaz ziemny o gęstości  $\rho_n = 0,7175$  kg/m<sup>3</sup> w ilości  $Q_n = 68\,000$  m<sup>3</sup>/h. Ciśnienie gazu na początku gazociągu wynosi  $P_1 = 3,56$  MPa, zaś średnia temperatura gazu  $T = 285,15$  K. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1.

Z danych liczbowych przedstawionych w tabeli 1 wynika, że najbardziej zbliżone wartości do wyników uzyskanych za pomocą równania energetycznego Jacoba (4) otrzymano z obliczeń przy wykorzystaniu równania WNII-Gaz (17) oraz równania Instytutu Technologii Gazu USA (20). Nieco niższe wartości, lecz bliskie teoretycznym wartościom przyjętym jako porównawcze, uzyskano obliczeniami za pomocą równania Waldena (14). Natomiast znacznie zawyżone wartości w stosunku do teoretycznych dają równania Ponhandle'a (8) i Renouarda (11).

**Tabela 1**

Wyniki obliczeń dla ustalenia odległości między tłoczniami gazu na trasie gazociągu wysokoprężnego

Równanie	Długość krytyczna $L_{kr}$	Długość optymalna $L$	Odległość między tłoczniami w funkcji $\varepsilon$					
			$\varepsilon = 1,25$	$\varepsilon = 1,4$	$\varepsilon = 1,5$	$\varepsilon = 1,6$	$\varepsilon = 1,7$	$\varepsilon = 1,8$
	km	km	km					
Jacoba	233,14	116,57	83,95	114,22	129,37	141,92	152,32	161,04
Ponhandle'a	297,89	148,95	107,33	154,45	167,86	181,67	194,97	206,11
Renouarda	262,98	131,50	94,75	126,84	148,19	160,38	172,12	181,96
Waldena	218,99	109,50	78,92	113,56	123,42	133,58	143,36	151,55
WNII-Gaz	236,71	118,35	80,28	122,83	133,49	144,45	156,60	163,91
USA	231,43	115,72	83,38	119,99	130,41	141,14	151,37	160,13

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono również, że odległość pomiędzy tłoczniami wzrasta prawie dwukrotnie, przy założeniu górnej wartości stosunku sprężania  $\varepsilon = 1,8$ , w porównaniu z odległością uzyskanej w dolnej granicy tego stosunku  $\varepsilon = 1,25$ .

Zalecane kryterium odległości między tłoczniami na trasie gazociągu dalekosieźnego jako  $L = 0,5L_{kr}$  mieści się w proponowanym przedziale  $\varepsilon = 1,25 \div 1,8$ . W rozpatrywanym przykładzie, przy założeniu powyższego kryterium i obliczonym za pomocą równania (4) ciśnieniu  $P_2 = 2,518$  MPa stosunek sprężania wynosi  $\varepsilon = 1,414$ . Dla obliczonej wartości  $\varepsilon$ , dla której  $P_2/P_1 = 0,707$  wyznaczono z wykresu przedstawionego na rysunku 1 wielkość stosunku  $L/L_{kr} = 0,5$ . Jeżeli przyjmiemy z tabeli 1 długość krytyczną  $L_{kr} = 233,14$  km, odległość między tłoczniami wyniesie  $L = 116,57$  km.

#### 4. GAZOCIĄG WYSOKOPRĘŻNY JAKO MAGAZYN GAZU

Gazociąg wysokiego ciśnienia jako element systemu gazowniczego, oprócz zasadniczej roli, jaką jest transport gazu ziemnego, może pełnić także funkcję magazynu gazu, z którego jest możliwość wyrównywania dobowych oraz godzinowych nierównomierności poboru gazu.

W czasie odbioru gazu z gazociągu mamy do czynienia z minimalnym oraz maksymalnym poborem, z czym związane są różne ciśnienia panujące w gazociągu, określane odpowiednio mianem ciśnienia:

- maksymalnego

$$P_{sr,max} = \frac{2}{3} \left( P_{1,max} + \frac{P_{2,max}^2}{P_{1,max}^2 + P_{2,max}^2} \right) \quad (21)$$

– minimalnego

$$P_{sr_{min}} = \frac{2}{3} \left( P_{1_{min}} + \frac{P_{2_{min}}^2}{P_{1_{min}} + P_{2_{min}}} \right) \quad (22)$$

Uwzględniając powyższe ciśnienia, panujące w skrajnych przypadkach pełnego i niepełnego stanu, temperaturę, a także parametry geometryczne gazociągu, oblicza się odpowiednio ilości zmagazynowanego gazu w przeliczeniu na warunki normalne

$$Q_{g_n_{max}} = \frac{\pi D^2}{4} L \frac{T_n}{P_n} \frac{P_{sr_{max}}}{z T_x} \quad (23)$$

oraz

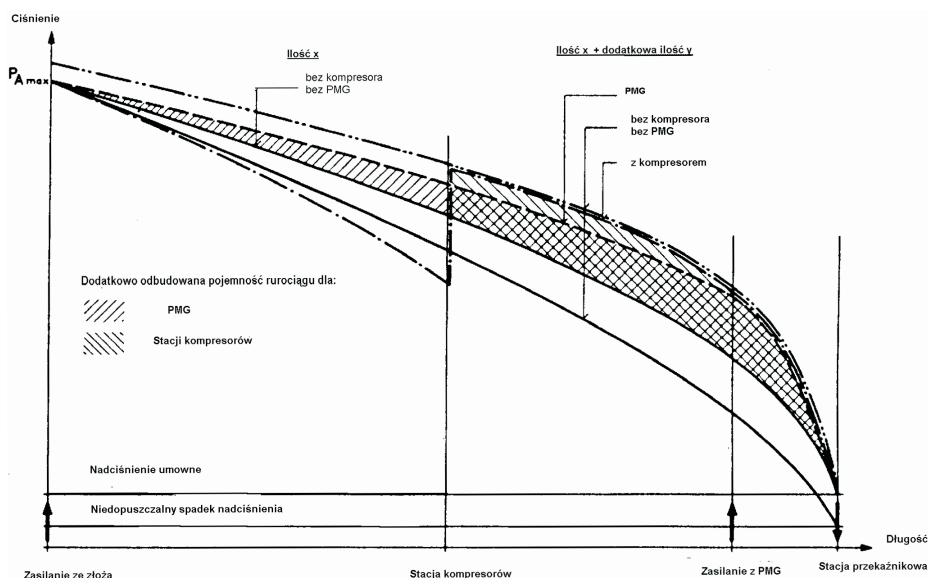
$$Q_{g_n_{min}} = \frac{\pi D^2}{4} L \frac{T_n}{P_n} \frac{P_{sr_{min}}}{z T_x} \quad (24)$$

Ilość gazu, jaka pozostaje w dyspozycji do wyrównania dobowych nierównomierności poboru, oblicza się z różnicy ilości w okresie największego i najmniejszego poboru gazu

$$Q = Q_{g_n_{max}} - Q_{g_n_{min}} \quad (25)$$

gdzie:

- $Q_{g_n_{max}}$  – ilość gazu przy pełnym stanie gazociągu,
- $Q_{g_n_{min}}$  – ilość gazu przy niepełnym stanie gazociągu.



Rys. 2. Krzywe spadku ciśnienia w gazociągu przy wzroście zdolności transportowej gazu z ilości  $x$  do  $x+y$  od stacji kompresorów i PMG z różnymi punktami zasilania [6]



Prognozowanie obciążeń dobowych jest istotnym kryterium przy obliczaniu gazociągów, w którym należy rozpatrzyć możliwość uzupełnień gazu alternatywnie poprzez włączenie podziemnego magazynu gazu (PMG) lub zastosowanie stacji kompresorów dla szybkiego zaspokojenia odbiorców przy rosnącym zapotrzebowaniu gazu. Wykres krzywych spadku ciśnienia w gazociągu przy wzroście zdolności przepustowej od stacji kompresorów i PMG przedstawia rysunek 2. Całość procesu dostawy gazu może być regulowana automatycznie w zależności od wymaganego nadciśnienia lub od natężenia przepływu. Dla stacji kompresorów w obu przypadkach regulacji istotną rolę odgrywa ciśnienie ssania [6].

## 5. PODSUMOWANIE

- Przeprowadzona analiza równań dla ustalenia odległości między tłoczniami wykazała, że najbardziej zbliżone wartości do wyników uzyskanych za pomocą energetycznego równania Jacoba otrzymano z obliczeń przeprowadzonych wg równań WNII-Gaz i Instytutu Technologii Gazu USA.
- Zalecane kryterium odległości między tłoczniami na trasie gazociągu wysokoprężnego  $L = 0,5L_{kr}$  winno mieścić się w proponowanym przedziale stosunku sprężania  $\varepsilon = 1,25 \div 1,8$ . Na podstawie obliczeń stwierdzono, że ze wzrostem wartości  $\varepsilon$  wzrasta odległość między tłoczniami (prawie dwukrotnie przy maksymalnej wartości  $\varepsilon$ ).
- Współpraca PMG z systemem przesyłowym gazu jest ściśle uzależniona od pracy stacji kompresorów na trasie gazociągu i wpływa na elastyczność tego systemu, zapewniając ciągłą dostawę do odbiorcy odpowiedniej ilości gazu pod wymaganym ciśnieniem.

## LITERATURA

- [1] Abramowski T.: *Problemy eksploatacji sieci gazowej wysokoprężnej i tłoczni gazu*. Materiały konferencyjne, Krynica 1995
- [2] Cerbe G.: *Grundlagen der Gastechnik*. Carl Hanser Verlag, 1988
- [3] Duliński W.: *Opory przepływu dla gazociągów dalekosiężnych oraz wykres spadku ciśnienia według Panhandle 'a*. Nafta, 1, 1960
- [4] Fasdd H.G., Wahle H.N.: *Der Antriebsgasverbrauch in Turboverdichterstationen für den Erdgastransport Methoden der planerischen Berechnung und Ergebnisse*. Zeitschriftenaufsatz Ruhrgas, gwf-Gas/Erdgas, 12, 1999
- [5] Fedorowicz R., Kołodziński E., Solarz L.: *Komputerowe modelowanie przesyłu gazu*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Cyber 2002
- [6] Graf. H.G.: *Betrieb von Pipeline – Verdichterstationen, ihre Funktionen, mögliche Optimierungen*. Haus der Technik – Vortragsveröffentlichungen, Heft 303, Essen, Vulkan-Verlag 1973
- [7] Heyen F., Wieke S.: *Verdichten und Antriebsmaschinen für Erdgasseicherung und den Erdgastransport, Auswal unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten*. Zeitschriftenaufsatz. Erdöl-Erdgas-Kohle, Heft 11, Band 114, 1998

- [8] Ropa C.E., Duliński W., Gacek Z.: *Badania rzeczywistych przepływów gazu w gazociągach średniego i wysokiego ciśnienia*. Materiały VIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej, Kraków, AGH 1997
- [9] Szilas A.P.: *Production and transport of oil and gas. Part A. Flow mechanics and productions*. Budapeszt, 1985
- [10] Walden H., Piekarski M.: *Analiza i weryfikacja doświadczalna wybranych wzorów na obliczenie gazociągów przesyłowych*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 9, 1991