

# Wyznaczanie czasu napełniania/oprózniczenia gazociągów wysokiego i średniego ciśnienia

## Calculation algorithm of filling/emptying time for high and middle pressure gas piping

Andrzej Barczyński, Paweł Barczyński<sup>\*)</sup>

**Słowa kluczowe:** napełnianie gazociągów, opróżnianie gazociągów

### Streszczenie

W artykule podano algorytmy do obliczania czasu napełniania i opróżniania gazociągów z uwzględnieniem składu, ciśnienia, temperatury i ściśliwości gazu oraz parametrów geometrycznych gazociągu. Przedstawione wzory i wykresy mogą być przydatne dla służb dyspozytorsko-eksploatacyjnych, umożliwiając szybkie i precyzyjne wyznaczenie czasu prowadzenia operacji opróżniania i napełniania gazociągów.

**Key words:** filling of gas pipelines, emptying of gas pipelines

### Abstract

The article provides algorithms for calculating the time of filling and emptying gas pipelines, taking into account the composition, pressure, temperature and compressibility of gas as well as geometric parameters of the gas pipeline. The presented formulas and diagrams can be useful for dispatch and operation services, allowing for quick and precise determination of the time of conducting the operations of emptying and filling of gas pipelines.

## 1. Wstęp

W wielu pracach eksploatacyjnych, prowadzonych na gazociągach wysokiego i średniego ciśnienia, występują operacje związane z ich napełnianiem lub opróżnianiem [4,5]. Na podstawie praw wynikających z termodynamiki (przepływ gazów ściśliwych) opracowano odpowiednie wzory dla przepływów krytycznych i podkrytycznych dla gazów ziemnych, pozwalające na obliczenie czasu napełniania i opróżniania gazociągów, z uwzględnieniem składu, ciśnienia, temperatury i ściśliwości gazu oraz parametrów geometrycznych gazociągu. Wzory te posłużyły do opracowywania odpowiedniego algorytmu i programu komputerowego.

Podano również wykresy dla typowych przypadków eksploatacyjnych przy napełnianiu i opróżnianiu gazociągów.

Zarówno program komputerowy jak i przedstawione wykresy mogą być przydatne dla służb dyspozytorsko-eksploatacyjnych, pozwalając na szybkie i precyzyjne wyznaczenie czasu prowadzenia operacji opróżniania i napełniania gazociągów.

## 2. Podstawowe wzory

Przepływ gazu przez otwór o powierzchni  $A$  można z pewnym przybliżeniem przyrównać do przepływu gazu przez dyszę Bendemann [2,3].

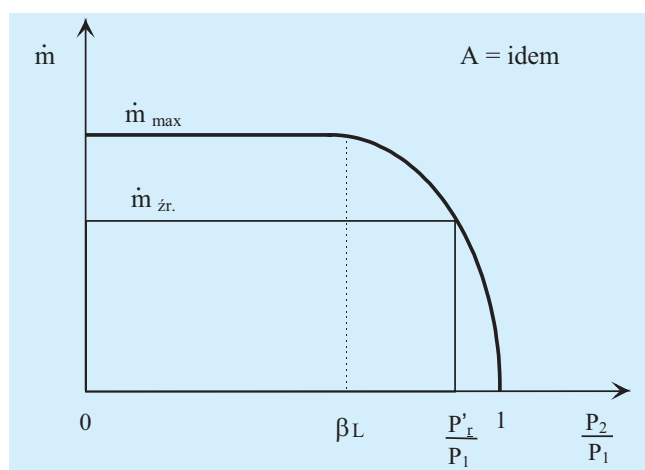
Przepływ ten jest charakteryzowany przez krytyczny stosunek ciśnień  $\beta_L$ .

$$\beta_L = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

gdzie:  $\kappa$  – wykładnik adiabaty.

Dla gazu ziemnego krytyczny stosunek wynosi około  $\beta_L = 0,544$ .

Masa strumienia gazu, w zależności od stosunku ciśnień  $p_2/p_1$ , zmienia się wg. krzywej podanej na rys. 1.



Rys. 1. Masowy strumień gazu przy zmiennym stosunku ciśnień  
Fig.1. Mass gas stream with variable pressure ratio

<sup>\*)</sup> dr hab. inż. Andrzej Barczyński – mechanik-energetyk, absolwent Politechniki Poznańskiej, doktorat obronił na Politechnice Śląskiej w dziedzinie energetyki gazowej, habilitację uzyskał na Politechnice Poznańskiej. Obecnie jest na emeryturze (w przemyśle gazowniczym – w Grupie Kapitałowej PGNiG pracował przez ponad 40 lat) i prowadzi firmę doradczą-szkoleniową oraz jest wykładowcą akademickim na różnych uczelniach technicznych.

mgr inż. Paweł Barczyński – Absolwent Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Poznańskiej w specjalności inżynieria środowiska, ukończył studia MBA w Warszawie. Obecnie jest dyrektorem ds. Technicznych w firmie ROMGOS SP. Z O.O. ENGINEERING SP.K. Ponadto, prowadzi firmę doradczą-projektową.

W przypadku gdy stosunek  $\frac{p_2}{p_1} \leq \beta_L$

prędkość gazu w otworze będzie równa prędkości dźwięku i stąd masowy strumień gazu będzie wielkością stałą.

W tym przypadku masowy strumień gazu można obliczyć wg wzoru

$$\dot{m}_{\max} = A * \varphi_{\max} \sqrt{p * \rho_g}$$

$$\varphi_{\max} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa+1} \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}}$$

gdzie:

$p_1$  – ciśnienie przed otworem,

$\rho_g$  – gęstość gazu.

W przypadku gdy:  $p_2/p_1 > \beta_L$  strumień masowy gazu przepływającego przez otwór o powierzchni A będzie można w przybliżeniu zastąpić równaniem elipsy :

$$\dot{m} = \dot{m}_{\max} \sqrt{1 - \left( \frac{p_2 - \beta_L * p_1}{p_1 - \beta_L * p_1} \right)^2}$$

Do powyższych wzorów należałoby wprowadzić dodatkowo współczynnik poprawkowy  $\alpha$  wynikający z oporów przepływu gazu przez króciec wydmuchowy (zasilający) do gazociągu. W celu wyznaczenia czasu napełnienia (opróżniania) gazociągu od ciśnienia  $p_1$  do  $p_2$  należy podzielić go na dwa zakresy:

• **zakres I (czas  $\Delta \tau_1$ )**

przepływ odbywa się z prędkością krytyczną (dźwięku), tzn. od ciśnienia  $p_1$  do ciśnienia  $p_2 = \beta_L p_1$  i wtedy czas opróżniania (napełniania) można wyznaczyć ze wzoru:

$$\Delta \tau_1 = \frac{V_{zr}}{\alpha * \varphi_{\max} * A * \sqrt{Z_{sr} * R * T_g}} * \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

gdzie:

$V_n$  – objętość gazociągu,

$\alpha$  – współczynnik oporu,

R – stała gazowa,

A – przekrój króćca wydmuchowego (zasilającego),

$Z_{sr}$  – średni współczynnik ściśliwości w zakresie  $p_1$  do  $p_2$

• **zakres II (czas  $\Delta \tau_2$ )**

przepływ odbywa się z prędkością niższą od krytycznej tzn.  $\beta_L p_1 < p_2$  i wtedy wyprowadzając zależności obowiązujące w termodynamice można uzyskać następujący wzór:

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\sqrt{(p_1 - \beta_L * p_0)^2 - (p_2 - \beta_L * p_1)^2}} = \frac{\alpha}{1 - \beta_L} * \frac{\sqrt{Z_{sr} * R * T_g}}{V_r} * \varphi_{\max} * A * d\tau$$

Po scałkowaniu otrzymano wzór:

$$\Delta \tau_2 = \left[ \frac{1 - \beta_L}{\alpha} * \frac{V_r}{\sqrt{Z_{sr} * R * T_g}} * \frac{1}{A * \varphi_{\max}} * \left[ \arcsin \frac{p_2 - \beta_L * p_1}{p_1 - \beta_L * p_1} - \arcsin \frac{p_1 - \beta_L * p_1}{p_1 - \beta_L * p_1} \right] \right] \quad (2)$$

Całkowity czas napełniania (opróżniania) gazociągu wyniesie  $\tau = \Delta \tau_1 + \Delta \tau_2$

Przy napełnianiu gazociągu od ciśnienia początkowego  $p_1$  do ciśnienia końcowego  $p_2$  mogą wystąpić ograniczenia wynikające ze:

- zdolności nadawczej źródła gazu ( $V_{zr}$ ), np. kopalni gazu, z którego napełniany jest dany gazociąg,
- dopuszczalnego wzrostu ciśnienia mierzonego na początku napełnianego gazociągu, wynikającego z wymogów eksploatacyjnych, np. dla sieci wysokiego ciśnienia wzrost ten nie powinien przekroczyć 100 kPa/min lub w wyjątkowych przypadkach – 300 kPa/min.

W przypadku, gdy zdolność nadawcza źródła zasilającego (wynikająca z ograniczonej zdolności źródła lub względów eksploatacyjnych) jest niższa od maksymalnego strumienia gazu, mogącego przepłynąć przez otwór króćca o średnicy A przy  $p_r/p_{zr} < \beta_L$ , wtedy napełnianie gazociągu będzie odbywało się przy ograniczonym strumieniu gazu do ciśnienia pośredniego  $p_r$ , którego wartość można wyznaczyć ze wzoru:

$$p_r = \beta_L * p_{zr} + (p_{zr} - \beta_L * p_{zr}) * \sqrt{1 - \frac{m_{zr}^2}{m_{\max}^2}} \quad (3)$$

przy czym:  $m_{zr} = V_{zr} * \rho_{zr}$

gdzie:

$p_{zr}$  – ciśnienie nadawcze źródła gazu zasilającego gazociąg,

$\rho_{zr}$  – gęstość gazu źródła zasilającego,

$m_{zr}$  – masowy strumień gazu napełniającego gazociąg.

W przypadku ograniczenia wynikającego z dopuszczalnego wzrostu ciśnienia, mierzonego na początku napełnianego gazociągu, wynikającego z wymogów eksploatacyjnych (np. wzrost ciśnienia  $\Delta p < G$ , gdzie G w kPa/min), masowy strumień gazu ze źródła napełniającego gazociąg można wyznaczyć wg. wzoru:

$$m_{zr} = G * V_{zr} * \rho_{zr}$$

gdzie: G – dopuszczalny (graniczny) wzrost ciśnienia

Wtedy czas napełniania oblicza się ze wzoru:

$$\Delta \tau = \Delta \tau_{1v} + \Delta \tau_2$$

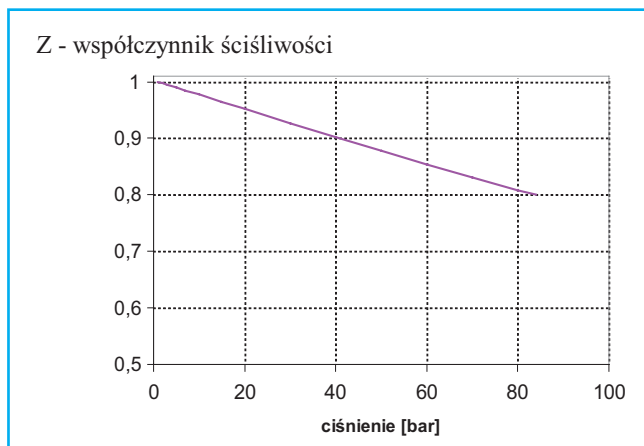
przy czym:

$$\Delta \tau_{1n} = \frac{V_r * p_r'}{\rho_{gn} * \varphi * A * \sqrt{\rho_{zr} * p_{zr}}} \quad (4)$$

oraz  $\Delta \tau_2$  – wyznacza się ze wzoru (2) przy założeniu, że  $p_1 = p_r$

Natomiast współczynnik Z, nazywany względnym współczynnikiem ściśliwości, jest bezwymiarowy i określa, o ile objętość zajmowana przez gaz ziemny różni się w stosunku do objętości gazu doskonałego. Wartość współczynnika Z zależy od składu chemicznego gazu, ciśnienia i temperatury. Gaz ziemny jako mieszanina cząsteczek o różnej budowie i wielkości zajmuje mniejszą objętość niż gaz doskonały. Różnica ta ma zauważalną wartość przy większych ciśnieniach.

Proponuje się przyjąć średnią wartość tego ciśnienia wg wykresu – rys. 2 [6]:



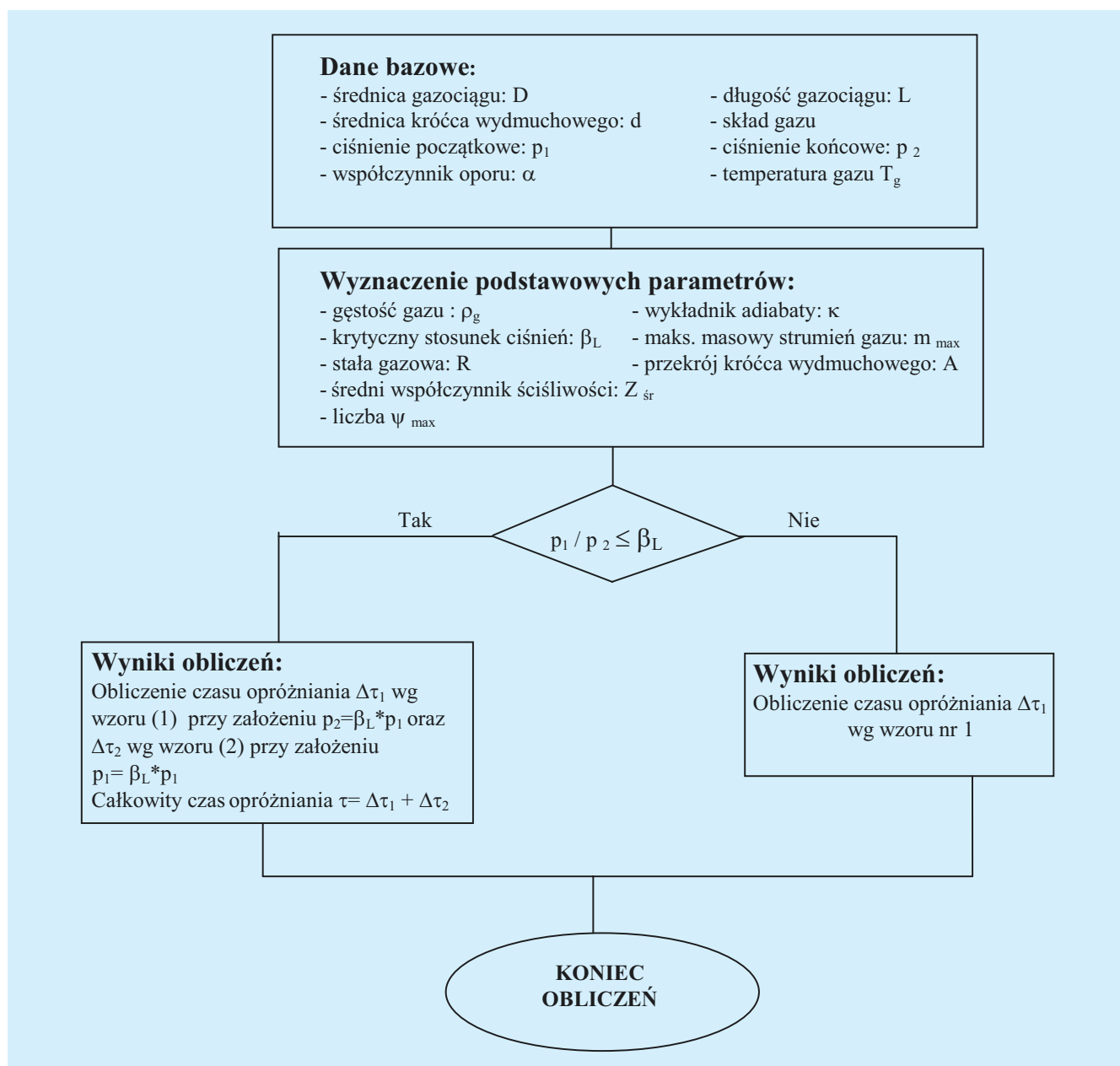
Rys. 2. Przybliżona zależność współczynnika Z od ciśnienia gazu  
 Fig. 2. Approximate dependence of the Z coefficient on gas pressure

### 3. Przykłady wyznaczania czasu opróżniania gazociągu

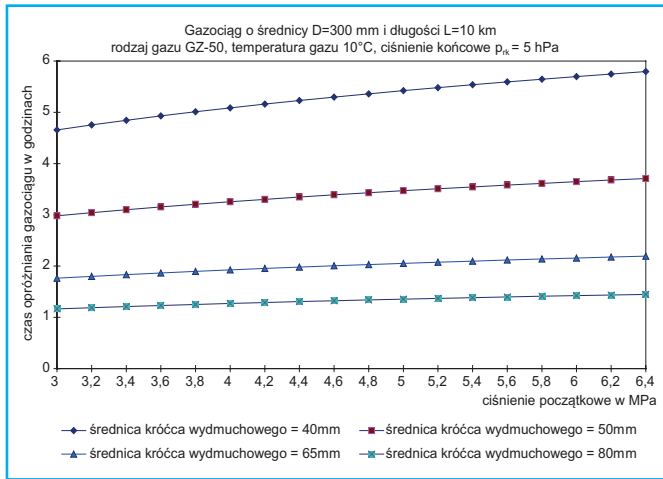
Na rys. 3 przedstawiono algorytm wyznaczania czasu opróżniania gazociągów o długości L i średnicy D przez króciec o średnicy d.

Przykład wyznaczania czasu opróżniania gazociągu o długości 10 km od ciśnienia początkowego 6.4 MPa do 3,0 MPa dla różnych średnic króćców wydmuchowych (upustowych) d = 40, 50, 65 oraz 80 mm przedstawiono na rys. 4 (dla średnicy gazociągu D = 300 mm) i na rys. 5 (dla gazociągu o średnicy D = 500 mm).

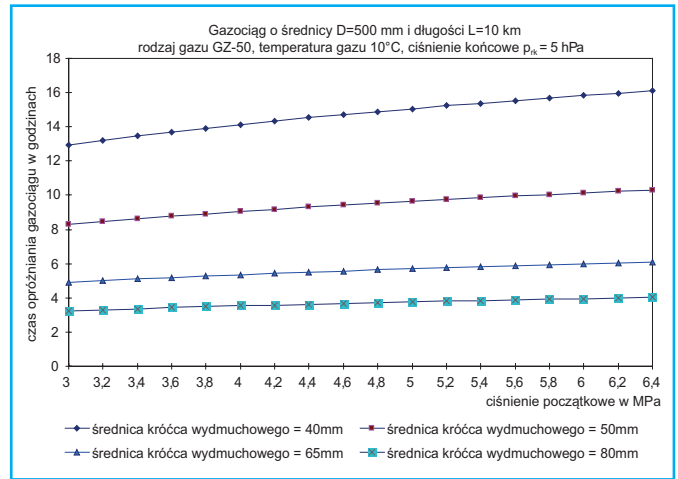
Zgodnie z [2] współczynnik poprawkowy  $\alpha$  przyjęto:  $(0,64 \div 0,65) \times 0,85 = 0,544$  do 0,5525. Do dalszych obliczeń przyjęto wartość  $\alpha = 0,5$ .



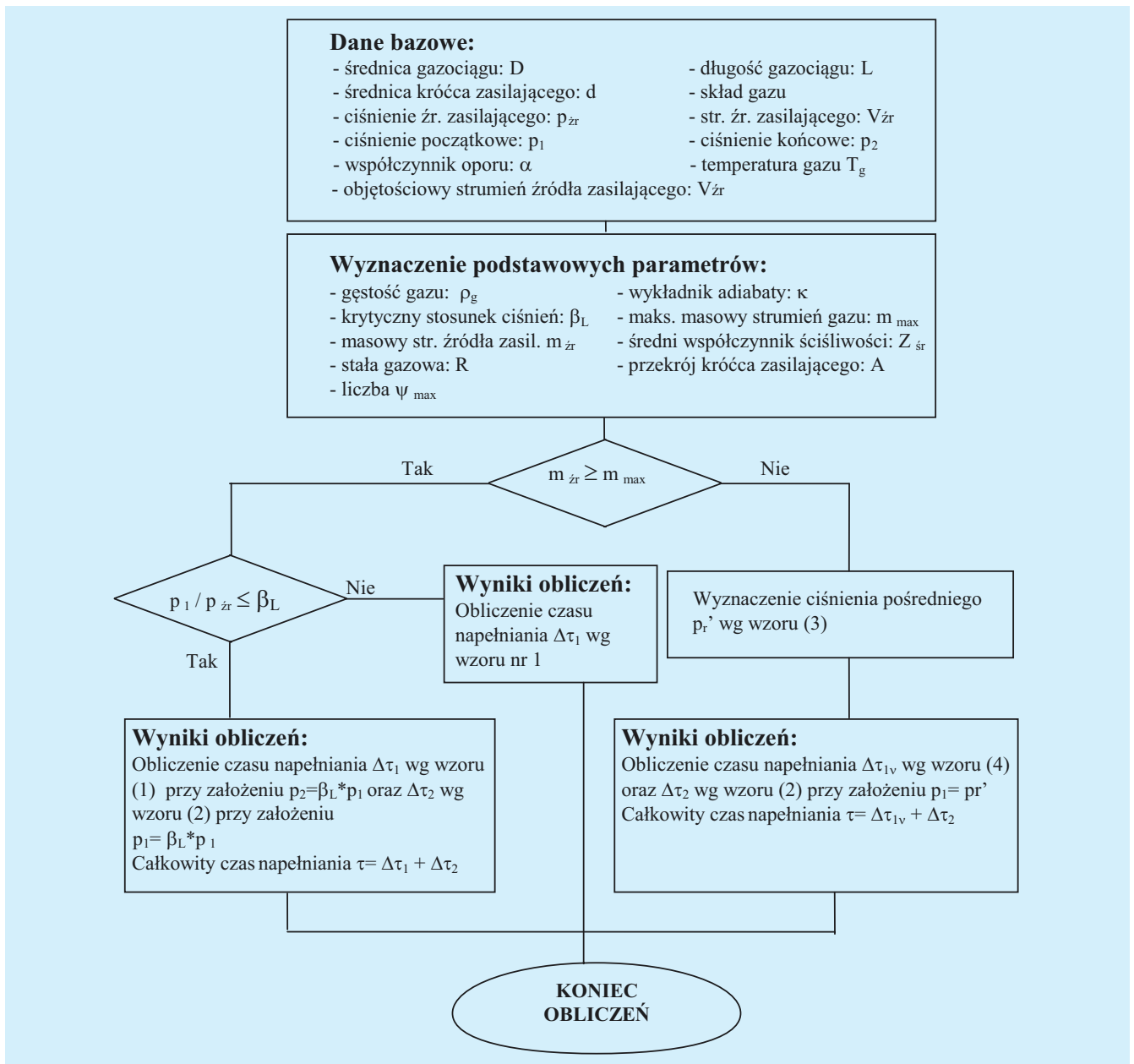
Rys. 3. Algorytm wyznaczania czasu opróżniania gazociągu  
 Fig. 3. Algorithm for determining the time of emptying the gas pipeline



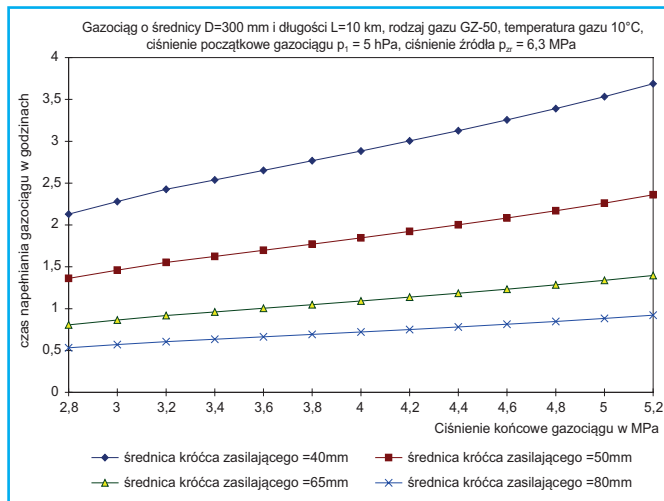
Rys. 4. Czas opróżniania gazociągu o średnicy  $D = 300$  mm  
 Fig. 4. Time of emptying the gas pipeline with a diameter of  $D = 300$  mm



Rys. 5. Czas opróżniania gazociągu o średnicy  $D = 500$  mm  
 Fig. 5. Time of emptying the gas pipeline with a diameter of  $D = 500$  mm

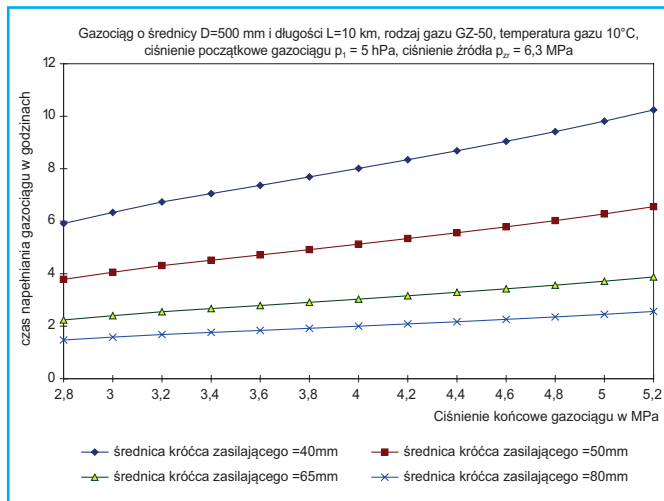


Rys. 6. Algorytm wyznaczania czasu napełniania gazociągu  
 Fig. 6. Algorithm for determining the time of filling the gas pipeline



Rys. 7. Czas napełniania gazociągu o średnicy  $D = 300$  mm przy założeniu, że  $m_{zr} \geq m_{max}$

Fig. 7. Filling time for the gas pipeline with a diameter of  $D = 300$  mm, assuming  $m_{zr} \geq m_{max}$



Rys. 8. Czas napełniania gazociągu o średnicy  $D = 500$  mm przy założeniu, że  $m_{zr} \geq m_{max}$

Fig. 8. Filling time for the gas pipeline with a diameter of  $D = 500$  mm, assuming  $m_{zr} \geq m_{max}$

#### 4. Przykłady wyznaczania czasu napełniania gazociągu

Na rys. 6 przedstawiono algorytm wyznaczania czasu napełniania gazociągu o średnicy  $D$  i o długości  $L$ .

Przykłady wyznaczania czasu przy napełnianiu gazociągu o długości 10 km od ciśnienia  $p_1 = 2,8$  MPa do  $p_2 = 5,2$  MPa, przy ciśnieniu nadawczym źródła  $p_{zr} = 6,3$  MPa dla różnych średnic otworów króćców zasilających ( $d = 40, 50, 65$  oraz  $80$  mm), którymi tłoczony jest gaz przy założeniu że  $m_{zr} \geq m_{max}$  podano na rys. 7 (dla gazociągu  $D = 300$  mm) i na rys. 8 (dla gazociągu  $D = 500$  mm).

Współczynnik oporu  $\alpha = 0,5$ .

#### 5. Podsumowanie

W wielu pracach eksploatacyjnych, prowadzonych na gazociągach wysokiego i średniego ciśnienia, występują operacje związane z ich napełnianiem lub opróżnianiem z paliwa gazowego.

Przedstawione wzory i algorytmy mogą być przydatne dla służb dyspozytorsko-eksploatacyjnych, umożliwiając w miarę precyzyjne wyznaczenie czasu prowadzenia takich operacji.

#### LITERATURA

- [1] Barczyński Andrzej. 2005. „Procesy termodynamiczne zachodzące w reductorze gazu” *Nowoczesne Gazownictwo* (4): 5–8 (X)
- [2] Ochęduszek Stanisław. 1967. „Termodynamika stosowana”, WNT, Warszawa.
- [3] Ochęduszek Stanisław i in. 1970. „Zbiór zadań z termodynamiki”, WNT, Warszawa.
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 grudnia 2009 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy budowie i eksploatacji sieci gazowych oraz uruchamianiu instalacji gazowych gazu ziemnego (Dz.U. z dnia 8 stycznia 2010 r.).
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 marca 1998 r. w sprawie wymagań kwalifikacyjnych dla osób zajmujących się eksploatacją urządzeń, instalacji i sieci oraz trybu stwierdzania tych kwalifikacji, rodzajów instalacji i urządzeń, przy których eksploatacji wymagane jest posiadanie kwalifikacji, jednostek organizacyjnych, przy których powołuje się komisje kwalifikacyjne, oraz wysokości opłat pobieranych za sprawdzanie kwalifikacji. (Dz.U. 1998 nr 59 poz. 377).
- [6] Vademecum Gazownika tom II „Infrastruktura przesyłowa i dystrybucyjna gazu ziemnego” – Praca zbiorowa pod redakcją Andrzeja Barczyńskiego, SITPNiG, Kraków 2013 r. – ISBN 978-83-934374-2-9.

