

Analiza zmian w przepływie mieszanin gazu ziemnego i wodoru siecią rurociągów

Analysis of changes in the flow of mixtures of natural gas and hydrogen in pipelines network

JOLANTA SZOPLIK, MARTA CIUKSZA

DOI 10.36119/15.2021.5.3

W pracy analizowano wyniki symulacji przepływu gazu, mieszanin gazu i wodoru (15% lub 30% objętościowych) lub czystego wodoru w sieci gazociągów niskiego ciśnienia. Obliczenia przeprowadzono na podstawie danych o rzeczywistym obciążeniu sieci gazem ziemnym wysokometanowym dla czterech wybranych temperatur otoczenia. Analizowano wyniki rozkładu nadciśnienia mieszanin gazu z wodorem lub czystego wodoru w rurociągach sieci dla maksymalnej wielkości nadciśnienia strumienia wprowadzanego do sieci, a następnie dla każdej mieszaniny i temperatury otoczenia dobrano wielkość minimalnego nadciśnienia strumienia zasilającego sieć. Wyniki badań opracowano w postaci zależności umożliwiającej oszacowanie wielkości minimalnego nadciśnienia strumienia w zależności od udziału wodoru w mieszaninie. Wykazano, że w przypadku transportu wodoru lub mieszanin gazu i wodoru zwiększa się obciążenie sieci, co wymaga zwiększenia nadciśnienia strumienia na wejściu do sieci, które może być nawet większe od maksymalnego nadciśnienia dopuszczalnego dla sieci niskiego ciśnienia.
Słowa kluczowe: sieć gazowa niskiego ciśnienia, symulacje przepływu, transport wodoru lub mieszanin gazu, rozkład nadciśnienia w sieci

The study analyzed the results of simulating the flow of gas, gas mixtures and hydrogen (15% or 30% by volume) or pure hydrogen in the low pressure gas pipeline network. The calculations were made on the basis of data on the actual network load with high-methane natural gas for four selected ambient temperatures. The results of the overpressure distribution of gas-hydrogen or pure hydrogen mixtures in the network pipelines were analyzed for the maximum value of the overpressure of the stream fed to the network, and then for each mixture and the ambient temperature, the value of the minimum overpressure of the stream supplying the network was selected. The test results were compiled in the form of a relationship that allows the estimation of the minimum flow overpressure depending on the hydrogen content in the mixture. It has been shown that when transporting hydrogen or gas-hydrogen mixtures, the network load increases, which requires an increase in the overpressure of the stream at the entrance to the network, which may be even greater than the maximum overpressure allowed for the low pressure network.

Keywords: low pressure gas pipeline network, gas flow simulations, transport of hydrogen or gas mixtures, distribution of overpressure in the network

Wprowadzenie

Zwiększanie udziału energii ze źródeł odnawialnych w ogólnym bilansie energii wymaga poszukiwania nowych sposobów jej magazynowania. Jednym ze sposobów magazynowania energii jest zatłaczanie wodoru pozyskanego podczas elektrolizy wody za pomocą nadwyżek energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych (słońca, wiatru), do gazociągów przesyłających gaz ziemny wysokometanowy. Badania wpływu wodoru, pozyskanego w technologii Power to Gas (PtG), magazynowanego w infrastrukturze gazu ziemnego

o dostarczanego odbiorcom końcowym są przedmiotem prac [1-7]. Zagadnienia analizowane w pracach można podzielić na dwie grupy. Pierwsza obejmuje analizę wpływu domieszek wodoru do gazu ziemnego na pracę urządzeń spalających paliwo gazowe i instalowanych u odbiorców (kuchenki, kotły i inne), natomiast drugą grupę zagadnień stanowią problemy wpływu wodoru na pracę urządzeń wspomagających transport i urządzenia do pomiaru wielkości strumienia gazu (reduktory, kompresory, gazomierze i inne).

Wodór, który pod względem właściwości fizykochemicznych bardzo różni się

od gazu ziemnego, istotnie zmienia parametry wytworzonej mieszaniny gaz ziemny – wodór. Zhao i wsp. [1] stwierdzili, że dodatek 15% objętościowych wodoru do gazu ziemnego nie wpływa niekorzystnie na pracę urządzeń kuchennych. Autorzy analizowali takie parametry, jak: czas zapłonu, charakterystyka płomienia, hałas spalania, temperatura palnika oraz emisje niespalonych składników. Jaworski i wsp. [2] na podstawie obszernych badań wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na pracę urządzeń zasilanych gazem wykazali, że dodatek 23% lub 15% wodoru do gazu nie wpływa istotnie na bezpieczeństwo

dr hab. inż. Jolanta Szoplik prof.ZUT, <https://orcid.org/0000-0003-1020-1079>; mgr inż. Marta Ciuksza doktorantka w Szkole Doktorskiej ZUT, <https://orcid.org/0000-0002-0094-9297> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej. Adres do korespondencji/ Corresponding author: Jolanta.Szoplik@zut.edu.pl

lub efektywne jego spalanie w tych urządzeniach, natomiast dodatek 36% wodoru do gazu zapewni utrzymanie odpowiedniej jakości mieszaniny dostarczanej odbiorcom. Gondal [3] wskazuje, że dodanie 2% wodoru do gazu ziemnego ma znikomy wpływ na pogorszenie jakości mieszaniny, natomiast zwiększenie udziału wodoru w mieszaninie do 10% może istotnie obniżyć jej parametry jakościowe. Według Autora zakres tolerancji urządzeń końcowych spalających gaz dla wodoru w mieszaninie wynosi 20-50%.

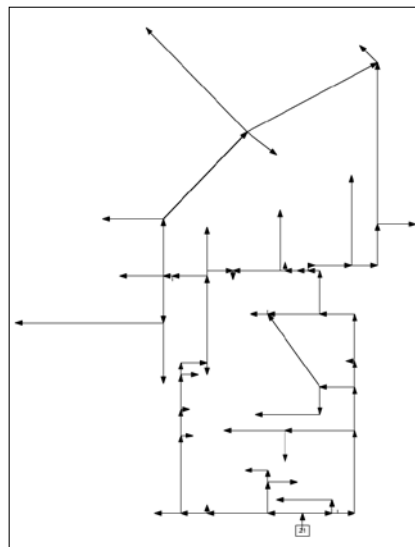
W przypadku badań wpływu wodoru na elementy infrastruktury systemu transportu gazu Gondal [3] wskazuje, że zagadnienie powinno być analizowane kompleksowo, bowiem elementem limitującym będzie urządzenie, które jest najbardziej wrażliwe na udział wodoru w mieszaninie. W przypadku sieci wysokiego ciśnienia takim elementem mogą być kompresory, które akceptują udział do 10% wodoru w mieszaninie, natomiast znacznie większa jest tolerancja wodoru (do 50%) przez elementy sieci dystrybucyjnej i magazyny. Jaworski i wsp. [2] podają, że udział wodoru w mieszaninie wynoszący 8% jest bezpieczny, biorąc pod uwagę prawidłową pracę urządzeń pomiarowych stosowanych w strefach zagrożonych wybuchem, natomiast 10% ze względu na dopuszczalną metodę przeliczania współczynnika ściśliwości, a 15% dodatek wodoru nie wpływa istotnie na pracę reduktorów średniego ciśnienia. Analiza wpływu wodoru lub biometanu do gazu ziemnego transportowanego siecią niskiego ciśnienia na parametry przepływu (wielkość strumienia, jego prędkość oraz nadciśnienie) analizowano w pracach [4-6]. Zdecydowana większość prac dotyczy analizy wpływu wodoru na pracę urządzeń spalających gaz, odmieňających gaz lub wspomagających transport gazu. Jednak porównywanie wyników badań uzyskanych w różnych krajach jest trudne, ponieważ wnioski słuszne w danym kraju (uzyskane dla danego składu gazu oraz materiałów, technologii i rozwiązań konstrukcyjnych) nie muszą być słuszne w innym kraju, dlatego też celowe jest prowadzenie własnych badań.

Celem pracy jest analiza zmian w przepływie gazu ziemnego, wodoru lub mieszanin gazu ziemnego i 15% lub 30% objętościowych wodoru na podstawie wyników symulacji przepływu wykonanych w programie GasNet. Do wyznaczenia strumieni wodoru lub mieszanin gazu ziemnego i wodoru zastosowano dane o rzeczywistym obciążeniu sieci niskiego ciśnienia w przyłączach sieci dla czterech wybranych temperatur otoczenia. Na pod-

stawie wyników symulacji przepływu w sieci analizowano rozkłady nadciśnienia strumieni w rurociągach sieci oraz dobiegano minimalne nadciśnienia strumienia zasilającego sieć, które opracowano w postaci zależności.

Charakterystyka rurociągów niskiego ciśnienia i analiza zmienności obciążenia sieci

Fragment istniejącej sieci rurociągów do transportu gazu ziemnego wysokometanowego pod niskim ciśnieniem ilustruje rys. 1. Sumaryczna długość wszystkich gazociągów wykonanych z PE o średnicach nominalnych od 50 mm do 250 mm wynosi $L = 3477$ m. Sieć zasilana jest za pomocą jednej stacji redukcyjnej średniego ciśnienia wejściowego Z1 i posiada 31 przyłączy, w których gaz pobierany jest



Rys. 1. Schemat sieci rurociągów niskiego ciśnienia
Fig. 1. Scheme of a low pressure pipeline network

przez odbiorców komunalnych. Wielkość nadciśnienia strumienia gazu w rurociągach sieci niskiego ciśnienia może zmieniać się w przedziale od 1700 Pa do 2500 Pa, a prędkość gazu w rurociągu powinna być mniejsza niż 5 m/s.

W warunkach rzeczywistych sieć transportowany jest gaz ziemny wysokometanowy (NG). Na podstawie badań wstępnych [7] wykazano, że obciążenie sieci zależy od wybranych czynników kalendarzowych (miesiąc, dzień tygodnia, godzina doby i inne) oraz pogodowych (temperatura otoczenia, prędkość wiatru i inne). Na podstawie danych, charakteryzujących trzyletnie rzeczywiste obciążenie sieci we wszystkich przyłączach sieci opracowano indywidualne zależności wielkości strumienia gazu pobieranego w danym

przyłączy od temperatury otoczenia, przedstawianej w postaci wskaźnika liczby stopniodni S_d . Natomiast zmienność obciążenia sieci w funkcji godziny doby opracowano na podstawie danych ze stacji redukcyjnej, po przygotowaniu procentowego godzinowego zapotrzebowania na gaz w okresie doby [4-6].

Metodykę wyznaczania zależności do szacowania dobowego zapotrzebowania na gaz w danym przyłączy sieci przedstawiono na podstawie przykładowego, uproszczonego zestawu danych zestawionych w tabeli 1. Dobowe zapotrzebowanie na gaz (Q) jest funkcją temperatury otoczenia T , którą można opisać modelem (1) [4-6]:

$$Q = a(18 - T) + b = a \cdot S_d + b \quad (1)$$

w którym: a oraz b – parametry modelu wyznaczone na podstawie rzeczywistego zapotrzebowania na gaz oraz temperatury otoczenia T [°C], natomiast S_d – wskaźnik liczby stopniodni obliczany dla założonej temperatury bazowej (w badaniach przyjmowano $T_b = 18^\circ\text{C}$) i rzeczywistej temperatury otoczenia T . Wyraz wolny (parametr b) w modelu (1) przedstawia zapotrzebowanie na gaz niezależne od temperatury otoczenia, który można wyznaczyć na podstawie danych o zapotrzebowaniu na gaz w okresie letnim. Stąd w celu oszacowania parametru b należy wielkość strumienia gazu pobieranego w okresie letnim ($T \geq 18^\circ\text{C}$) podzielić przez liczbę dni tego okresu.

$$b = \frac{\sum(Q)_{I+II+III}}{\sum(n)_{I+II+III}} = \frac{163}{122} = 1,336 \quad (2)$$

Natomiast współczynnik a w modelu (1) przedstawia część zapotrzebowania na gaz zależną od temperatury T otoczenia. Na podstawie danych zestawionych w tabeli 1 wielkość parametru a wynosi:

$$a = \frac{\sum(Q)_{I+II+III} - (\sum(n)_{I+II+III} \cdot b)}{\sum(S_d)_{I+II+III}} = \frac{3391 - (708 \cdot 1,336)}{4505} = 0,543 \quad (3)$$

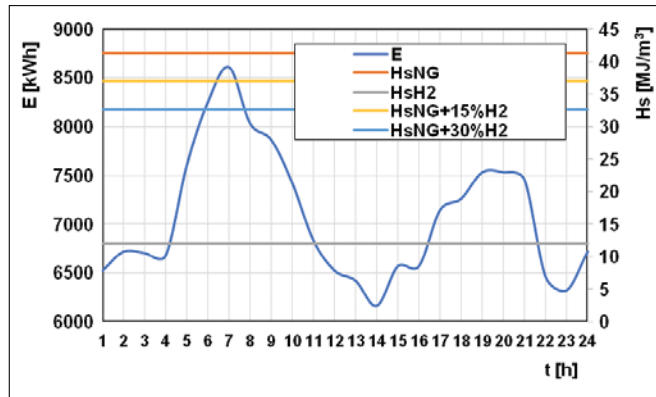
Na podstawie tak opracowanych zależności dla wszystkich przyłączy sieci wyznaczono dobowe zapotrzebowanie na gaz w zależności od temperatury otoczenia. Natomiast godzinowe zapotrzebowanie na gaz w każdym z przyłączy szacowano na podstawie dobowego zapotrzebowania na gaz w przyłączy i procentowego godzinowego przepływu gazu przez stację zasilającą.

Tabela 1. Przykładowe dane do szacowania parametrów modelu (1)

Table 1. Example data for estimating model parameters (1)

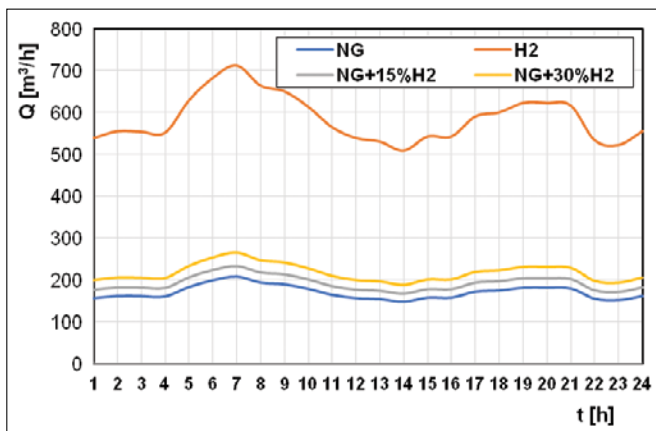
Nr okresu (miesiące)	$\Sigma(S_d)$ [°doba]	$\Sigma(n)$ [doba]	$\Sigma(Q)$ [m ³]
I (I ÷ VI)	2613	308	1912
II (VII ÷ VIII)	0	122	163
III (IX ÷ XII)	1892	278	1316
Suma:	4505	708	3391

czeń wielkości strumieni dla czterech przykładowych gazów o różnym udziale wodoru w mieszaninie ($y_{H_2} = 0; 0,15; 0,3$ lub 1) w kolejnych godzinach doby o średniej temperaturze otoczenia $T = -16^\circ\text{C}$. Analizując wyniki zamieszczone na rys. 3 można zauważyć, że wielkość obciążenia sieci jest 3,4 razy większa w przypadku przesyłania wodoru w porównaniu do gazu ziemnego bez dodatku wodoru.



Rys. 2. Zmienność zapotrzebowania na energię E w kolejnych godzinach doby ($T = -16^\circ\text{C}$) oraz wartość ciepła spalania H_s dla wybranych mieszanin gazu i wodoru
Fig. 2. Variability of energy demand E in the following hours of the day ($T = -16^\circ\text{C}$) and the value of heat of combustion H_s for selected natural gas and hydrogen mixtures

Godzinowe strumienie gazu ziemnego pobierane w przyłączych były podstawą do wyznaczenia zapotrzebowania na energię E w każdym przyłączy (równanie 4). Przyjmując, że siecią gazową dostarczana jest odbiorcom energia E [kWh] można oszacować wielkość strumienia Q_m (równanie 5) mieszaniny gazu ziemnego (y_{NG}) i dowolnej ilości wodoru (y_{H_2}) lub czystego wodoru ($y_{H_2} = 1$). Na rys. 2 przedstawiono godzinową zmienność zapotrzebowania na energię w dniu o średniej temperaturze otoczenia $T = -16^\circ\text{C}$ oraz zamieszczono wartości ciepła spalania gazu ziemnego $H_{s(NG)} = 41,306$ [MJ/m³], wodoru $H_{s(H_2)} = 12,09$ [MJ/m³] oraz wybranych mieszanin gazu ziemnego i wodoru dodawanego w różnych ilościach. Wielkość strumienia mieszaniny gazu ziemnego i wodoru zależy od udziału wodoru w mieszaninie i zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości wodoru (y_{H_2}). Na rys. 3 zamieszczono wyniki obli-



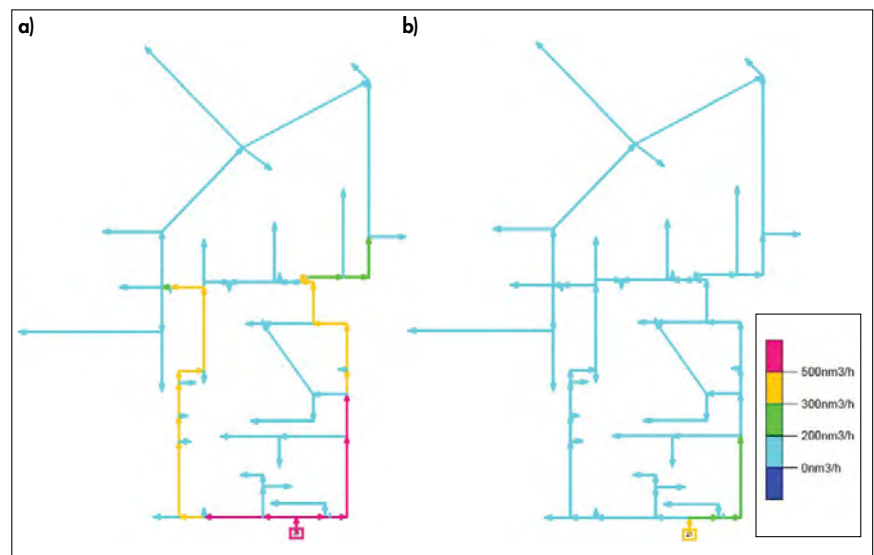
Rys. 3. Zmienność zapotrzebowania na gaz ziemny NG ($y_{H_2} = 0$), wódór H_2 ($y_{H_2} = 1$) lub mieszaninę gazu ziemnego i wodoru w ilości 15% lub 30% ($y_{H_2} = 0.15$ lub 0.30)
Fig. 3. Variability of demand for natural gas NG ($y_{H_2} = 0$), hydrogen H_2 ($y_{H_2} = 1$) or a mixture of natural gas and hydrogen at 15% or 30% ($y_{H_2} = 0.15$ or 0.30)

$$E = Q_{NG} \cdot H_{s_{NG}} \quad (4)$$

$$Q_m = \frac{E}{H_{s_m}} = \frac{Q_{NG} \cdot H_{s_{NG}}}{H_{s_m}} = \frac{Q_{NG} \cdot H_{s_{NG}}}{(H_{s_{NG}} \cdot y_{NG}) + (H_{s_{H_2}} \cdot y_{H_2})} \quad (5)$$

Analiza dynamiki gazu, wodoru lub mieszanin w rurociągach sieci

Dynamikę gazu w rurociągach sieci analizowano na podstawie wyników symulacji przepływu w stanie ustalonym wykonanych w programie GasNet dla różnych zestawów danych opisujących obciążenie sieci w zależności od temperatury otoczenia. Strumienie gazu oraz mieszanin gazu i wodoru lub czystego wodoru wyznaczono na podstawie rzeczywistego zapotrzebowania na gaz w każdym przyłączy sieci z rys. 1, opracowanych za pomocą modelu (1) oraz zależności (5).

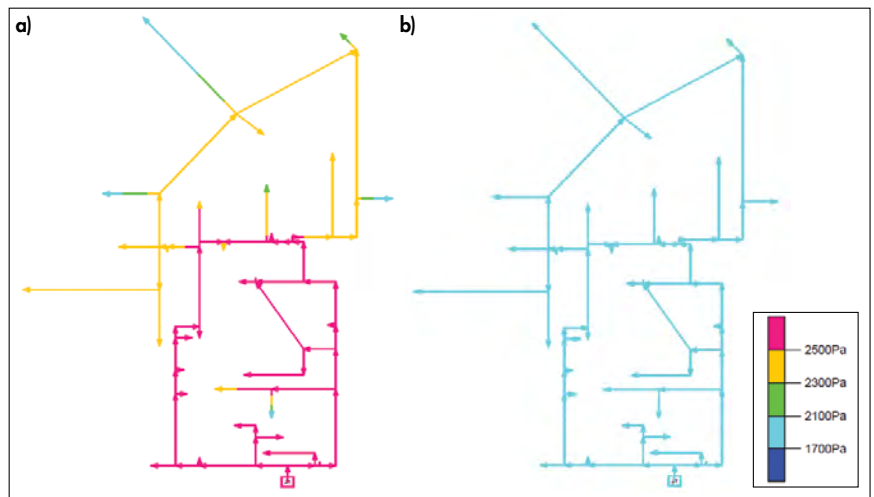


Rys. 4. Rozkład strumieni gazu w rurociągach sieci, $T = -16^\circ\text{C}$; a) wyniki dla wodoru, $Q_{(H_2)} = 1494$ m³/h; b) wyniki dla gazu ziemnego, $Q_{(NG)} = 437$ m³/h
Fig. 4. Distribution of streams in network pipelines, $T = -16^\circ\text{C}$; a) results for hydrogen, $Q_{(H_2)} = 1494$ m³/h; b) results for natural gas, $Q_{(NG)} = 437$ m³/h

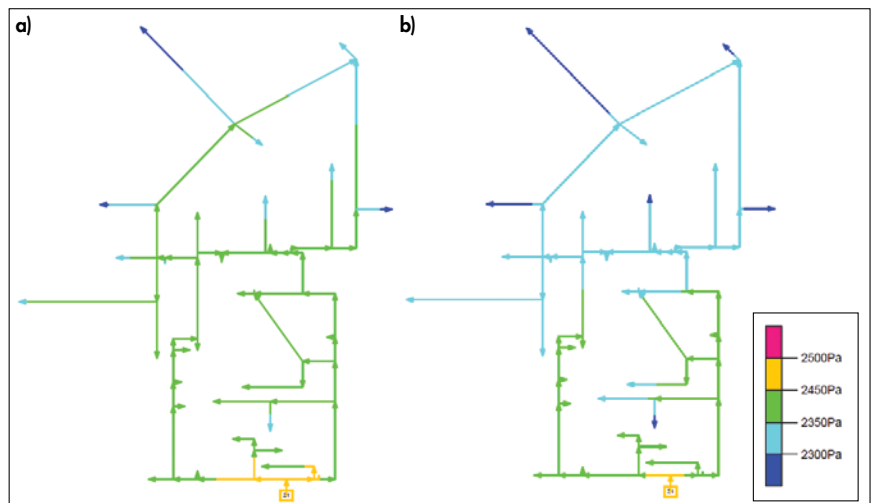
Symulacje przepływu gazu lub wodoru w rurociągach sieci wykonano dla maksymalnego (dopuszczalnego dla sieci niskiego ciśnienia) nadciśnienia strumienia zasilającego $P_{we} = 2500$ Pa, a następnie wyznaczono minimalną wielkość nadciśnienia gazu w stacji redukcyjnej, zapewniającego transport gazu w całej sieci pod nadciśnieniem większym niż wartość minimalna (dopuszczalna w sieci niskiego ciśnienia $P_{min} = 1700$ Pa). Na rys. 4 zamieszczono wyniki obliczeń w postaci rozkładu strumieni gazu ziemnego lub wodoru we wszystkich rurociągach sieci

dla wybranego dnia o temperaturze otoczenia $T = -16^{\circ}\text{C}$. Wyraźnie większe (3,4 razy większe) obciążenie sieci jest obserwowane w przypadku transportu siecią czystego wodoru w porównaniu do gazu ziemnego wysokometanowego. Wzrost obciążenia sieci skutkuje wzrostem nadciśnienia strumieni w rurociągach sieci.

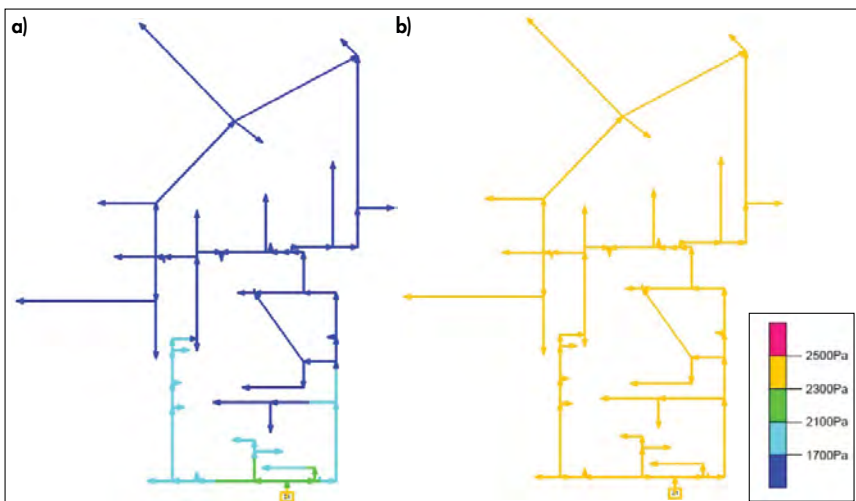
Na rys. 5 przedstawiono wyniki nadciśnienia gazu lub wodoru w rurociągach, uzyskane podczas symulacji przepływu w sieci przy maksymalnej wielkości nadciśnienia strumienia zasilającego sieć $P_{we} = 2500\text{ Pa}$. W przypadku transportu siecią wodoru (rys. 5a) w większości rurociągów nadciśnienie jest znacznie mniejsze niż nadciśnienie minimalne (1700 Pa), co pokazuje, że sieć ta nie ma zdolności do transportu wodoru do odbiorców (przyjmując limity nadciśnienia dla sieci gazowej niskiego ciśnienia) lub należy zwiększyć nadciśnienie strumienia w stacji redukcyjnej. Natomiast nadciśnienie strumieni gazu ziemnego we wszystkich rurociągach są większe niż 2300 Pa, co oznacza, że w sieci są jeszcze rezerwy przepustowości dla gazu ziemnego lub można obniżyć nadciśnienie strumienia zasilającego sieć. Dlatego też podczas symulacji przepływu wyznaczono najniższe nadciśnienie strumienia gazu ziemnego lub wodoru zasilającego sieć, ale wystarczające do transportu gazu do każdego przyłącza sieci pod nadciśnieniem większym niż 1700 Pa. Wyniki symulacji w postaci rozkładu nadciśnienia strumieni gazu ziemnego lub wodoru w rurociągach w dniu o temperaturze otoczenia $T = -16^{\circ}\text{C}$ ilustruje rys. 6. Wykazano, że nadciśnienie wejściowe strumienia wodoru może być nawet 1,9 razy większe w porównaniu do nadciśnienia strumienia gazu ziemnego i jest znacz-



Rys. 6. Rozkład nadciśnienia strumieni w rurociągach sieci, $T = -16^{\circ}\text{C}$; a) wyniki dla H_2 , $P_{we} = 3545\text{ Pa}$; b) wyniki dla gazu ziemnego NG, $P_{we} = 1898\text{ Pa}$
 Fig. 6. Distribution of gas overpressure in network pipelines, $T = -16^{\circ}\text{C}$; a) results for H_2 , $P_{we} = 3545\text{ Pa}$; b) results for natural gas NG, $P_{we} = 1898\text{ Pa}$



Rys. 7. Rozkład nadciśnienia mieszaniny gazu ziemnego i wodoru w rurociągach sieci, $T = -16^{\circ}\text{C}$, $P_{we} = 2500\text{ Pa}$; a) $Q_m = 489\text{ m}^3/\text{h}$, $y_{\text{H}_2} = 0.15$, b) $Q_m = 555\text{ m}^3/\text{h}$, $y_{\text{H}_2} = 0.3$
 Fig. 7. Distribution of overpressure of a mixture of natural gas and hydrogen in the pipelines of the network, $T = -16^{\circ}\text{C}$, $P_{we} = 2500\text{ Pa}$; a) $Q_m = 489\text{ m}^3/\text{h}$, $y_{\text{H}_2} = 0.15$, b) $Q_m = 555\text{ m}^3/\text{h}$, $y_{\text{H}_2} = 0.3$



Rys. 5. Rozkład nadciśnienia strumieni w rurociągach sieci, $T = -16^{\circ}\text{C}$, $P_{we} = 2500\text{ Pa}$; a) wyniki dla wodoru H_2 , $Q_{(\text{H}_2)} = 1494\text{ m}^3/\text{h}$; b) wyniki dla gazu ziemnego NG, $Q_{(\text{NG})} = 437\text{ m}^3/\text{h}$
 Fig. 5. Distribution of gas overpressure in network pipelines, $T = -16^{\circ}\text{C}$, $P_{we} = 2500\text{ Pa}$; a) results for hydrogen H_2 , $Q_{(\text{H}_2)} = 1494\text{ m}^3/\text{h}$; b) results for natural gas NG, $Q_{(\text{NG})} = 437\text{ m}^3/\text{h}$

nie większe niż maksymalne nadciśnienie dla sieci niskiego ciśnienia. Można więc stwierdzić, że w tym przypadku i przy zachowaniu warunków analogicznych jak dla transportu gazu ziemnego siecią niskiego ciśnienia nie można przesyłać wodoru w dniach o dużym zapotrzebowaniu na energię (np. w sezonie zimowym).

W celu oceny możliwości sieci do transportu mieszanin gazu ziemnego i wodoru wykonano symulację przepływu mieszanin o zadanym udziale wodoru w gazie ziemnym dla danych wejściowych charakteryzujących maksymalne pobory mieszanin w przyłączach sieci (w dniu o temperaturze $T = -16^{\circ}\text{C}$). Wielkości strumieni mieszanin o udziale objętościowym wodoru $y_{\text{H}_2} = 0,15$ lub $0,3$ pobieranych we wszystkich przyłączach sieci wyznaczono na podstawie zależności (1) oraz (5).

Wyniki symulacji w postaci rozkładu nadciśnienia mieszanin gazu i wodoru w rurociągach sieci dla nadciśnienia strumienia zasilaającego $P_{we} = 2500$ Pa zamieszczono na rys. 7. Dodanie do gazu ziemnego 15% lub 30% wodoru wpływa na wzrost strumienia mieszaniny transportowanej siecią, jednak przy maksymalnym nadciśnieniu strumienia na wejściu do sieci we wszystkich rurociągach sieci obserwuje się nadciśnienie większe niż 2300 Pa, co wskazuje na zdolność sieci do transportu mieszanin o takim składzie nawet przy dużym obciążeniu sieci w sezonie zimowym. Analogiczne wyniki symulacji, jednak uzyskane dla minimalnej wielkości nadciśnienia strumienia mieszaniny gazu i wodoru w ilości 15% lub 30% zamieszczono na rys. 8. Wykazano, że sieć można przesyłać mieszaniną gazu i wodoru ($y_{H_2} < 30\%$) przy nadciśnieniu na wejściu do sieci znacznie mniejszym niż 2500 Pa, co w przypadku sieci polietylenowej i obecności w gazie wodoru ma znaczenie, gdyż zmniejsza przenikanie wodoru przez ścianki rurociągu.

Symulacje przepływu gazu lub jego mieszanin z wodorem, wykonane dla czterech wybranych temperatur otoczenia $T =$

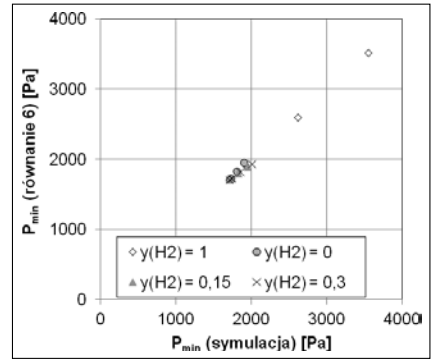
$-16, -4, 10$ oraz 18°C umożliwiły wyznaczenie minimalnych wartości nadciśnienia strumienia zasilaającego sieć. Rezultaty obliczeń zamieszczone na rys. 9 pokazują, że wzrost temperatury otoczenia oraz wielkości ciepła spalania wpływają na mniejsze obciążenie sieci, dzięki czemu nadciśnienie strumienia zasilaającego sieć także się zmniejsza.

Na podstawie wyznaczonych podczas symulacji minimalnych wartości nadciśnienia strumienia zasilaającego sieć opracowano równanie (6), na podstawie którego można oszacować wartość nadciśnienia na wejściu do sieci gazowej w zależności od składu mieszaniny oraz temperatury otoczenia T (średni względny błąd równania wynosi 1%, maksymalny 3%). Porównanie wartości minimalnego nadciśnienia strumienia wyznaczonego z równania (6) oraz uzyskanego podczas symulacji dla czterech temperatur oraz czterech rodzajów gazu ilustruje rys. 10.

$$P_{min} = aT^2 + bT + c \quad (6)$$

gdzie:

$$a = 1,464y_{H_2}^2 - 0,5154y_{H_2} + 0,1528 \quad (7)$$



Rys. 10.

Porównanie minimalnego nadciśnienia strumienia wyznaczonego z zależności (6) i uzyskanego podczas symulacji przepływu

Fig. 10. Comparison of the minimum overpressure of the stream determined from the dependence (6) and obtained during the flow simulation

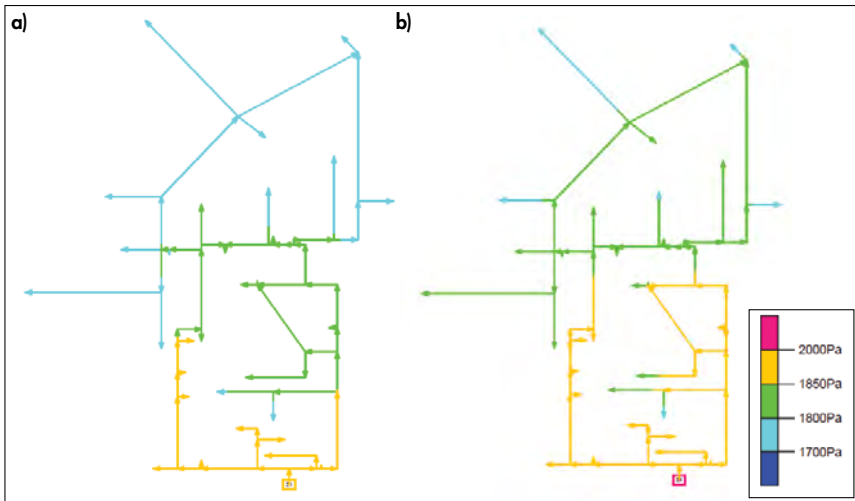
$$b = -71,589y_{H_2}^2 + 24,329y_{H_2} - 7,7496 \quad (8)$$

$$c = 843,43y_{H_2}^2 - 279,38y_{H_2} + 1794,3 \quad (9)$$

Utrzymywanie w sieci rurociągów wykonanych z PE możliwie najmniejszego nadciśnienia, zwłaszcza w przypadku dodawania do gazu ziemnego wodoru lub transportu czystego wodoru pozwala zmniejszyć ilość wodoru, która może przenikać przez ścianki gazociągów. Gaz ziemny, którego głównym składnikiem jest metan charakteryzuje się znacznie mniejszą wartością współczynnika przenikalności gazu niż wódór, stąd im większy udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym, wyższe nadciśnienie w sieci oraz większa długość rurociągów sieci, tym większa objętość gazu przenika przez ścianki rurociągów. Objętość gazu V [cm^3], który przenika przez ściankę rurociągu lub sieci o długości L [m], wykonanego z PE dla zadanego szeregu wymiarowego SDR i współczynnika przenikalności gazu K [$\text{cm}^3/(\text{m MPa doba})$] dla wybranych wielkości nadciśnienia gazu P_{min} [MPa] w okresie $t = 365$ dni wyznaczono z zależności [8]:

$$V = K\pi P_{min} tL(\text{SDR}) \quad (10)$$

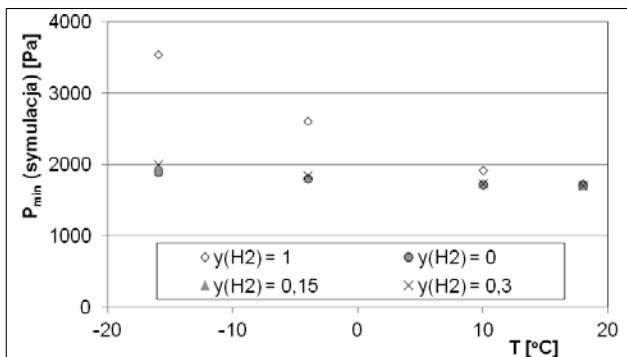
Wyniki obliczeń objętości wodoru lub metanu przenikających przez ścianki sieci rurociągów z rys. 1 dla wyznaczonych podczas symulacji wielkości minimalnego nadciśnienia w sieci w zależności od temperatury otoczenia zestawiono w tabeli 2. Znacznie większa wartość współczynnika przenikalności K dla wodoru oraz większe nadciśnienie gazu w sieci powodują, że większa objętość wodoru niż metanu przenika przez ścianki rurociągów sieci. Wyniki zamieszczone w tabeli 2 pokazują, że nie są to bardzo duże objętości, jednak biorąc pod



Rys. 8.

Rozkład nadciśnienia mieszaniny gazu ziemnego i wodoru w rurociągach sieci, $T = -16^\circ\text{C}$; a) $Q_m = 489$ m^3/h , $y_{H_2} = 0,15$, $P_{we} = 1942$ Pa, b) $Q_m = 555$ m^3/h , $y_{H_2} = 0,3$, $P_{we} = 2004$ Pa

Fig. 8. Distribution of overpressure of a mixture of natural gas and hydrogen in the pipelines of the network, $T = -16^\circ\text{C}$; a) $Q_m = 489$ m^3/h , $y_{H_2} = 0,15$, $P_{we} = 1942$ Pa, b) $Q_m = 555$ m^3/h , $y_{H_2} = 0,3$, $P_{we} = 2004$ Pa



Rys. 9.

Wykres zależności minimalnego nadciśnienia P_{min} strumienia zasilaającego sieć w funkcji temperatury T
Fig. 9. Graph of the dependence of the minimum overpressure P_{min} of the stream supplying the network as a function of temperature T

uwagę, że jest to sieć niskiego ciśnienia a granice wybuchowości dla wodoru wyznaczają szerszy przedział, w którym powstaje mieszanina wybuchowa (od 4,1% do 74,2%), to może mieć znaczenie przy wprowadzaniu wodoru do sieci miejskiej.

Tabela 2. Wyniki obliczeń objętości metanu lub wodoru, które przenikają przez ścianki rurociągów sieci z rys. 1

Table 2. Calculation results of the volume of methane or hydrogen that permeate through the walls of the pipelines of the network shown in Fig. 1

	H ₂		CH ₄	
K [cm ³ /(m MPa doba)]	2.20		0.56	
T [°C]	P _{min} [Pa]	V [m ³]	P _{min} [Pa]	V [m ³]
-16	3545	0.345	1898	0.0466
-4	2611	0.252	1800	0.0442
10	1918	0.185	1724	0.0423
18	1727	0.167	1704	0.0418

Podsumowanie

Dodawanie wodoru do gazu ziemnego transportowanego siecią niskiego ciśnienia

może być metodą zagospodarowania nadwyżek energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych i ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Jednak wprowadzanie do sieci gazowej innych paliw gazowych, znacznie różniących się właściwościami od gazu ziemnego, ma istotny wpływ na parametry pracy sieci i proces transportu gazu do odbiorców. Dodanie wodoru do gazu powoduje obniżenie ciepła spalania powstałej mieszaniny gaz – wodor, co skutkuje transportem większych strumieni mieszaniny przy znacznie większym nadciśnieniu w sieci i większą przenikalnością wodoru przez ścianki rurociągów wykonanych z PE. W przypadku transportu siecią czystego wodoru nadciśnienie wodoru w sieci może być znacznie większe niż dopuszczalne w sieci gazowej niskiego ciśnienia.

LITERATURA

[1] Zhao Y., McDomell V., Samuelsen S. Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of cooktop

burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44, 12239-12253

- [2] Jaworski J., Kukulska-Zajac E., Kułaga P. Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego. *Nafta-Gaz*, 2019, 10, 625-632
- [3] Gondal I. A. Hydrogen integration in power-to-gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(3), 1803-1815
- [4] Szoplík J., Stelmasińska P. Analysis of gas network storage capacity for alternative fuels in Poland. *Energy*, 2019, 172, 343 – 353.
- [5] Szoplík J. Application of Flow Simulation Results in the Calculation of Gas Networks. *Practical Aspects of Chemical Engineering: Selected Contributions from PAIC 2019*, 461-472
- [6] Szoplík J., Ciuksza M. Sterowanie przepływem gazu w sieci na podstawie wyników symulacji przepływu. *Instal*, 2020, 4, 17-21; DOI 10.36119/15.2020.4.3
- [7] Szoplík J. Forecasting of natural gas consumption with artificial neural networks. *Energy*, 2015, 85, 208 – 220.
- [8] Praca pod redakcją A. Barczyńskiego. *Sieci gazowe polietylenowe. Projektowanie, budowa, użytkowanie. SITPNiG – Ośrodek Szkolenia i Rzeczoznawstwa w Poznaniu – Grupa Terenowa Rzeczoznawców, Poznań, 2006*