

Maciej Łach

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Dokładność wyznaczania współczynnika ściśliwości gazu z podwyższoną zawartością wodoru – porównanie metod obliczeniowych

W artykule przedstawiono porównanie różnych metod wyznaczania współczynnika ściśliwości gazu przy zwiększonej zawartości wodoru. Jako kontrolną zastosowano metodę GERG-2008. Badanymi metodami były: AGA8 i SGERG 88.

Słowa kluczowe: gaz ziemny, gaz koksowniczy, wodór, współczynnik ściśliwości gazu, równania AGA8, SGERG 88, GERG-2008.

The accuracy of determining the compressibility factor for gas with increased hydrogen content – comparison of the calculation methods

The article presents a comparison of different methods of determining the gas compressibility factor for gas with enhanced hydrogen content. As the control method was used GERG-2008. The AGA8 and the SGERG 88 were the tested methods.

Key words: natural gas, coke gas, hydrogen, compressibility factors of gas, AGA8, SGERG 88, GERG-2008 equation.

Wstęp

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. [11] gazomierze i przeliczniki, które są używane do rozliczeń gazu, podlegają prawnej kontroli metrologicznej. Ze względu na przepisy zawarte w rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 28 grudnia 2007 r. [12] w polskim systemie rozliczeniowym gazu funkcjonują dwie wiodące metody obliczania współczynnika ściśliwości gazu. Pierwsza zgodnie z PN-EN ISO 12213-2 – obliczenia z zastosowaniem składu molowego (równanie AGA8-92DC) [9], druga zgodnie z PN-EN ISO 12213-3 – obliczenia z wykorzystaniem właściwości fizycznych (równanie SGERG-88) [10]. Obie określają szczegółowo dopuszczalne udziały molowe poszczególnych składników gazu. Obecnie z uwagi na problem ochrony środowiska, jak również działania związane z dywersyfikacją źródeł energii, coraz częściej mamy do czynienia z mieszaninami gazowymi, w których zawartość poszczególnych składników wykracza poza granice zdefinio-

wane w ww. normach. Doskonałym przykładem jest tutaj gaz koksowniczy, w którym znaczną część mieszaniny stanowi wodór (na podstawie badań INiG – PIB: od 34,17% mol/mol do 60,34% mol/mol) [2], podczas gdy wyżej wymienione normy dopuszczają maksymalny udział molowy wodoru na poziomie 10%. Z gazami z podwyższoną zawartością wodoru mamy do czynienia również w przypadku źródeł energii odnawialnych takich jak gaz syntezowy, powstający w procesie molekularnego recyklingu odpadów [4], czy w przypadku zagospodarowania nadwyżek energii pochodzących z elektrowni wiatrowych poprzez dodawanie wodoru do sieci gazociągowych [1]. Niniejsza praca skupia się właśnie na mieszaninach gazowych z różną zawartością wodoru. Dokonano analizy poprawności działania obu wspomnianych powyżej metod poza ich dopuszczalnymi granicami na tle metody kontrolnej GERG-2008 [8], która dopuszcza udział molowy wodoru do 40%. Porównania przeprowadzono

w granicach warunków gazociągowych, tj. temperatur od -24°C do 65°C i ciśnień od 0 bar do 120 bar. Wykonano

obliczenia dla kilku próbek gazu ze stopniowo zwiększającą zawartością wodoru.

Współczynnik ściśliwości gazu – metody obliczania

Do pomiaru objętości gazu stosuje się takie prawa i zależności jak równanie stanu Clapeyrona, prawo Avogadra czy stałość ciepła właściwego. Zależności te dotyczą tzw. gazu doskonałego, który jest pojęciem hipotetycznym. W przyrodzie mamy jednak do czynienia z gazami rzeczywistymi, dla których wymienione wyżej prawa mają zastosowanie tylko przy niskich ciśnieniach oraz niezbyt wysokich temperaturach. W gazociągach, gdzie gaz często transportowany jest pod wysokim ciśnieniem i w zmiennej temperaturze, należy dodatkowo uwzględnić odstępstwa od praw gazu doskonałego. Miarą tych odstępstw jest tzw. współczynnik ściśliwości gazu Z , do którego wyznaczenia stosuje się specjalne metody obliczeniowe. Bezwymiarowy współczynnik ściśliwości gazu Z ma charakter najprostszego równania stanu gazu rzeczywistego. Współczynnik Z jest stosunkiem objętości molowej gazu rzeczywistego do

objętości molowej gazu doskonałego w tych samych warunkach ciśnienia i temperatury. Obecnie w przemyśle gazowniczym do obliczania współczynnika ściśliwości obowiązują porównywalne ze sobą dwie metody ISO: metoda SGERG-88 [9], oparta na wirialnym równaniu stanu i właściwościach fizycznych oraz metoda AGA8-92DC [10], oparta na równaniu typu wirialnego i składzie gazu. Dla podanego w obu normach podstawowego zakresu składu wartości współczynników ściśliwości są obliczane z dokładnością do 0,1%, z wykluczeniem obszarów w pobliżu równowagi dwufazowej gaz–ciecz. W odniesieniu do udziału procentowego wodoru obie z powyższych metod charakteryzują się maksymalnym dopuszczalnym zakresem nieprzekraczającym 10% objętości molowej całej mieszanki. Metodą, która dopuszcza większy udział molowy (do 40%), jest GERG-2008 [8].

Metoda AGA8-92DC

W metodzie AGA8-92DC [9] wykorzystuje się równanie oparte na założeniu, że gaz ziemny o jakości gazociągowej może być, w celu obliczenia jego właściwości objętościowych, jednoznacznie scharakteryzowany za pomocą analizy składu. Analiza ta, a także ciśnienie i temperatura są stosowane jako dane wejściowe metody. W metodzie wykorzystuje się szczegółową analizę składu molowego, w której zaleca się uwzględnić wszystkie składniki, dla których wartość ułamka molowego przekracza 0,00005. Zwykle obejmuje to wszystkie węglowodory nasycone do C_7 lub C_8 oraz azot, dwutlenek węgla i hel. W przypadku innych gazów konieczne jest również wzięcie pod uwagę składników dodatkowych, takich jak para wodna, siarkowodór i eten. Współczynnik ściśliwości wyznaczany jest przy użyciu szczegółowego charakterystycznego równania AGA8 (określanego jako równanie AGA8-92DC), będącego rozszerzonym rów-

naniem typu wirialnego. Równanie to określono w raporcie AGA nr 8 [5]. Metodę tę stosuje się tylko do mieszanin jednofazowych w stanie gazowym (powyżej temperatury punktu rosy). Zmiennymi wejściowymi wymaganymi do stosowania

Tablica 2. Dopuszczalne wartości ułamków molowych składników gazu dla metody AGA8-92DC

Składnik	Ułamek molowy	
	zakres normalny	zakres rozszerzony
Metan CH_4	0,7÷1,00	0,5÷1,00
Azot N_2	0÷0,20	0÷0,50
Dwutlenek węgla CO_2	0÷0,20	0÷0,30
Etan C_2H_6	0÷0,10	0÷0,20
Propan C_3H_8	0÷0,035	0÷0,05
Butany C_4H_{10}	0÷0,015	0÷0,015
Pentany C_5H_{12}	0÷0,005	0÷0,005
Heksany C_6H_{14}	0÷0,001	0÷0,001
Heptyny C_7H_{16}	0÷0,0005	0÷0,0005
Octany oraz wyższe węglowodory C_{8+}	0÷0,0005	0÷0,0005
Wodór H_2	0÷0,10	0÷0,10
Tlenek węgla CO	0÷0,03	0÷0,03
Hel He	0÷0,005	0÷0,005
Woda H_2O	0÷0,00015	0÷0,00015

Tablica 1. Dopuszczalne zakresy wartości właściwości fizycznych gazu dla metody AGA8-92DC

Parametr	Zakres normalny	Zakres rozszerzony
Ciśnienie bezwzględne P	0÷120 bar	0÷650 bar
Temperatura t	$-10,15\div 64,85^{\circ}\text{C}$	$-48,15\div 76,85^{\circ}\text{C}$
Ciepło spalania H_s	30÷45 MJ/m ³	20÷48 MJ/m ³
Gęstość względna d	0,55÷0,80	0,55÷0,90

równania AGA8-92DC są ciśnienie bezwzględne, temperatura bezwzględna i skład molowy. Dopuszczalne zakresy parametrów gazu oraz dopuszczalne wartości udziałów molowych poszczególnych składników w gazie podane zostały w tablicach 1 i 2. Niepewność wyników dla wszystkich ga-

zów w granicach stężeń określonych przez zakres normalny (gaz ziemny o jakości gazociągowej) wynosi $\pm 0,1\%$ natomiast dla zakresu rozszerzonego maksymalnie może wynosić $\pm 0,6\%$. Szczegółowy rozkład niepewności dla zakresu rozszerzonego dostępny jest w pozycji [9].

Metoda SGERG-88

W metodzie SGERG-88 [10] stosuje się równanie oparte na założeniu, że gaz ziemny o jakości gazociągowej może być jednoznacznie scharakteryzowany przez odpowiedni i określony zestaw mierzalnych właściwości fizycznych, wykorzystywanych do obliczania jego właściwości objętościowych. W niniejszej metodzie właściwości te oraz ciśnienie i temperatura są stosowane jako dane wejściowe. Wykorzystuje się tu: ciepło spalania, gęstość względną oraz zawartość dwutlenku węgla. Metoda jest szczególnie użyteczna w typowej sytuacji, gdy nie jest znany cały skład molowy gazu, ale może być również preferowana ze względu na swoją prostotę. W przypadku gazów z dodatkami syntetycznymi powinna być znana zawartość wodoru. Metoda obliczania z wykorzystaniem właściwości fizycznych jest oparta na równaniu wirialnym GERG 88 (SGERG-88) w wersji standardowej dla gazów ziemnych. W metodzie tej traktuje się gaz ziemny jako mieszaninę pięciu składników, tj. równoważnego gazu węglowodorowego (gazu o właściwościach termodynamicznych identycznych z właściwościami mieszaniny węglowodorów zawartych w gazie ziemnym), azotu, dwutlenku węgla, wodoru i tlenku węgla. Do odpowiedniego scharakteryzowania właściwości termodynamicznych gazu węglowodorowego wymagane jest również jego molowe ciepło spalania.

Zmiennymi wejściowymi wymaganymi do zastosowania równania SGERG-88 są ciśnienie absolutne, temperatura bezwzględna, ciepło spalania odniesione do jednostki objętości, gęstość względna, ułamki molowe dwutlenku węgla i wodoru. Gęstość względna odnosi się do warunków normalnych (101,325 kPa i 0°C), a wartość ciepła spalania odnosi się do warunków normalnych (101,325 kPa i 0°C) i temperatury spalania 25°C . Metoda ta znajduje zastosowanie jedynie dla mieszanin w fazie gazowej (powyżej punktu rosy). Dopuszczalne zakresy parametrów gazu oraz dopuszczalne wartości udziałów procentowych poszczególnych składników w gazie podane zostały w tablicach 3 i 4.

Niepewność wyznaczania współczynnika ściśliwości w zakresie temperatury od $-10,15^{\circ}\text{C}$ do $64,85^{\circ}\text{C}$ i przy ciśnieniach do 100 bar wynosi $\pm 0,1\%$, natomiast $\pm 0,2\%$ pomiędzy 100 bar i 120 bar dla gazów ziemnych, których ciepło spalania wynosi $30\text{--}45 \text{ MJ/m}^3$, gęstość względna mieści się w zakresie od 0,55 do 0,80 i które posiadają następujący skład:

Tablica 3. Dopuszczalne zakresy wartości właściwości fizycznych gazu dla metody SGERG-88

Parametr	Zakres normalny	Zakres rozszerzony
Ciśnienie bezwzględne P	0÷100 bar	0÷120 bar
Temperatura t	$-10,15\text{--}64,85^{\circ}\text{C}$	$-10,15\text{--}64,85^{\circ}\text{C}$
Ciepło spalania H_s	30÷45 MJ/m ³	20÷48 MJ/m ³
Gęstość względna d	0,55÷0,80	0,55÷0,90

Tablica 4. Dopuszczalne wartości ułamków molowych składników gazu dla metody SGERG-88

Składnik	Ułamek molowy	
	zakres normalny	zakres rozszerzony
Metan CH ₄	0,7÷1,00	0,5÷1,00
Azot N ₂	0÷0,20	0÷0,50
Dwutlenek węgla CO ₂	0÷0,20	0÷0,20
Etan C ₂ H ₆	0÷0,10	0÷0,20
Propan C ₃ H ₈	0÷0,035	0÷0,05
Butany C ₄ H ₁₀	0÷0,015	0÷0,015
Pentany C ₅ H ₁₂	0÷0,005	0÷0,005
Heksany C ₆ H ₁₄	0÷0,001	0÷0,001
Heptany C ₇ H ₁₆	0÷0,0005	0÷0,0005
Octany oraz wyższe węglowodory C ₈₊	0÷0,0005	0÷0,0005
Wodór H ₂	0÷0,10	0÷0,10
Tlenek węgla CO	0÷0,03	0÷0,03
Hel He	0÷0,005	0÷0,005
Woda H ₂ O	0÷0,00015	0÷0,00015

- $x_{\text{N}_2} \leq 0,20$;
- $x_{\text{CO}_2} \leq 0,09$;
- $x_{\text{C}_2\text{H}_6} \leq 0,10$;
- $x_{\text{H}_2} \leq 0,10$.

W przypadku gazów zawierających CO₂, dla których ułamek molowy dwutlenku węgla przewyższa 0,09, niepewność $\pm 0,1\%$ jest zachowana dla ciśnień do 60 bar i temperatur od $-10,15^{\circ}\text{C}$ do $64,85^{\circ}\text{C}$. Szczegółowy rozkład niepewności dla zakresu rozszerzonego, którego zakładana niepewność jest większa, zamieszczony został w pozycji [10].

Metoda GERG-2008

Metoda GERG-2008 [8] bazuje na tym, że gaz ziemny albo dowolny inny rodzaj mieszaniny gazowej może być w pełni charakteryzowany do obliczenia jego właściwości termodynamicznych poprzez analizę jego składu. Analiza wszystkich składników wraz z temperaturą i gęstością gazu są wystarczającymi danymi wejściowymi do obliczeń za pomocą tej metody. W praktyce jako zmienne wejściowe dostępne są temperatura i ciśnienie gazu, a zatem należy najpierw za pomocą podanych w metodzie równań iteracyjnie obliczyć gęstość. Mieszanina gazowa reprezentowana jest w tej metodzie przez 21 składników. Dopuszczalne zakresy parametrów gazu oraz dopuszczalne wartości ułamków molowych poszczególnych jego składników podane zostały w tablicach 5 i 6. Niepewność wyznaczania współczynnika ściśliwości dla mieszanin jednofazowych w zakresie normalnym jest mniejsza lub równa 0,1%, w zakresie rozszerzonym mieści się w przedziale 0,2÷0,5%. Więcej o metodzie GERG-2008 można znaleźć w pozycji [3].

Tablica 5. Dopuszczalne zakresy wartości właściwości fizycznych gazu dla metody GERG-2008

Parametr	Zakres normalny	Zakres rozszerzony
Ciśnienie absolutne P	0÷350 bar	0÷700 bar
Temperatura t	-183,1÷176,85°C	-213,15÷426,85°C

Tablica 6. Dopuszczalne wartości ułamków molowych składników gazu dla metody GERG-2008

Składnik	Ułamek molowy	
	zakres normalny	zakres rozszerzony
Metan CH_4	0,7÷1,00	0,3÷1,00
Azot N_2	0÷0,20	0÷0,55
Dwutlenek węgla CO_2	0÷0,20	0÷0,30
Etan C_2H_6	0÷0,10	0÷0,25
Propan C_3H_8	0÷0,035	0÷0,14
n-butan + i-butan C_4H_{10}	0÷0,015	0÷0,06
n-pentan + i-pentan C_5H_{12}	0÷0,005	0÷0,005
n-heksan C_6H_{14}	0÷0,001	0÷0,002
n-heptan C_7H_{16}	0÷0,0005	0÷0,001
Oktan + nonan + dekan C_{8+}	0÷0,0005	0÷0,0005
Wodór H_2	0÷0,10	0÷0,40
Tlen O_2	0÷0,0002	0÷0,02
Tlenek węgla CO	0÷0,03	0÷0,13
Woda H_2O	0÷0,00015	0÷0,0002
Siarkowodór H_2S	0÷0,0002	0÷0,27
Hel He	0÷0,005	0÷0,005
Argon Ar	0÷0,0002	0÷0,0005

Oprogramowanie komputerowe

Na potrzeby niniejszych badań opracowany został program, który umożliwił porównanie wyników obliczeń uzyskanych za pomocą metod AGA8 i SGERG-88 z metodą kontrolną GERG-2008. Rysunek 1 przedstawia interfejs programu. Na podstawie wprowadzonych parametrów gazu, ciśnienia i temperatury oraz warunków odniesienia (bazowych) program oblicza współczynnik ściśliwości gazu za pomocą metody kontrolnej i badanej. Z uzyskanych wyników obliczany jest błąd procentowy E_C , będący miarą rozbieżności pomiędzy metodami.

$$E_C = (Z_{badany}/Z_{kontrolny} - 1) \cdot 100\%$$

gdzie:

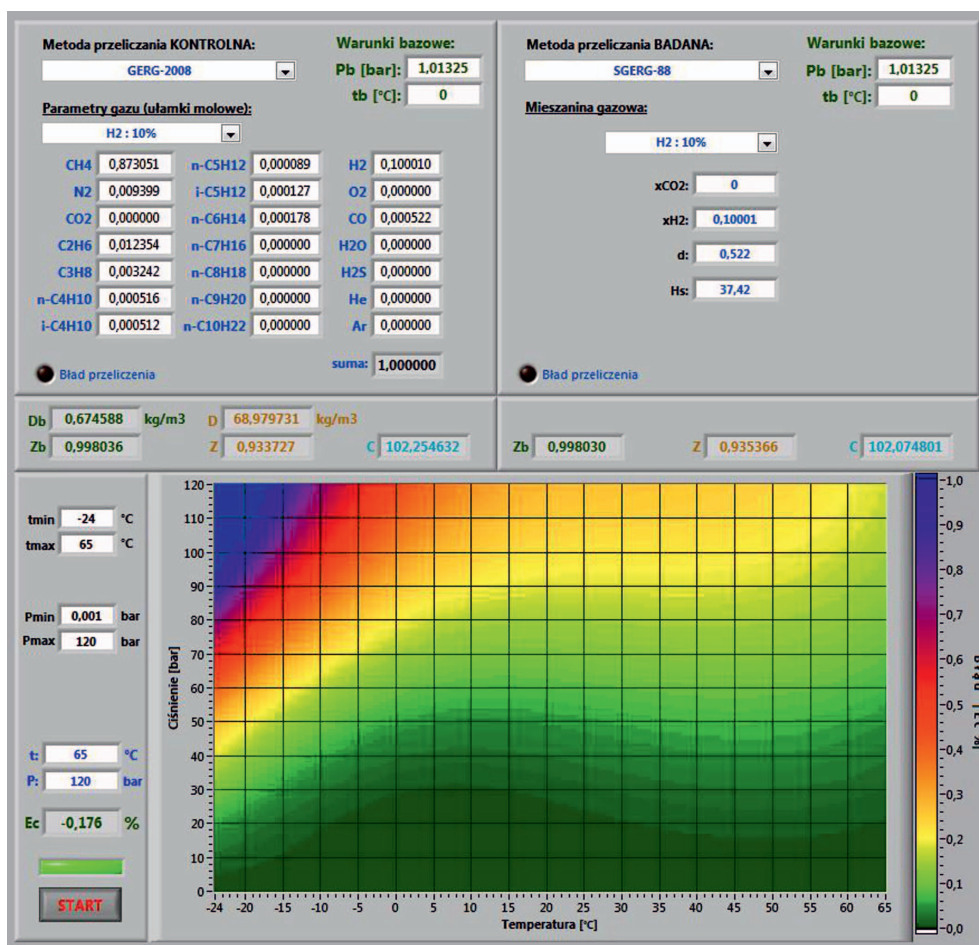
$Z_{kontrolny}$ – współczynnik ściśliwości wyznaczony za pomocą metody kontrolnej,

Z_{badany} – współczynnik ściśliwości wyznaczony za pomocą metody badanej.

Aby sprawdzenie poprawności obliczania według danej metody miało sens, porównanie takie należy wykonać w całym zakresie ciśnieniowym i temperaturowym badanej

metody. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawiane są na wykresie, gdzie wartość błędu $|E_C|$ określana jest za pomocą kolorowej skali. Kolor ciemnozielony oznacza zeroowy błąd pomiędzy metodami, żółty jest zarezerwowany dla błędów wynoszących około 0,2%, czerwony dla 0,5%, różowy – 0,7%, a niebieska barwa to błąd w granicach 1%. Wartości pośrednie błędów są na wykresach oznaczone za pomocą odcieni tych kolorów.

Najistotniejszą część oprogramowania stanowią podprogramy z algorytmami dla poszczególnych metod obliczeniowych. W przypadku metod AGA8-92DC i SGERG-88 wykorzystano podprogramy ze stanowiska pomiarowego do badania przeliczników objętości w Zakładzie Metrologii Przepływów w Instytucie Nafty i Gazu – PIB w Krakowie. Instytut jest jednostką notyfikowaną o numerze identyfikacyjnym 1450. W ramach dyrektywy MID INiG – PiB posiada notyfikację w odniesieniu do gazomierzy i przeliczników w zakresie modułów: B (badanie typu) oraz D (zapewnienie jakości produkcji) [6]. Jako podprogram dla metody GERG-2008 zastosowano oprogramowanie autorstwa prof. dr. inż. Wolfganga Wagnera z Ruhr-Universität w Bochum w Niemczech [7].



Rys. 1. Interfejs programu komputerowego

Badania

Celem badań było sprawdzenie poprawności działania metod obliczeniowych AGA8-92DC i SGERG-88 dla próbek gazu, w których zawartość wodoru znacznie przekracza dopuszczalne granice określone w tych metodach. Obie metody zezwalają na maksymalny udział molowy wodoru na poziomie 10%. Badanie miało pozwolić na określenie, w jakich granicach ciśnień, temperatur i składów gazu stosowanie tych dwóch metod jest jeszcze możliwe, a otrzymywane wartości błędów akceptowalne.

Aby badanie mogło być wykonane poprawnie, należało porównać wyniki otrzymane z ww. metod z metodą kontrolną, która zezwala na większy udział wodoru. Taką metodą jest GERG-2008, która w rozszerzonym zakresie dopuszcza 40% udziału molowego wodoru w składzie gazu.

Badania przeprowadzono na wygenerowanych komputerowo próbkach gazu ze stopniowo zwiększaną zawartością wodoru w przedziale 0÷40% mol/mol (tablica 7). Próbki generowane były poprzez mieszanie czystego wodoru z typowym gazem wysokometanowym tak, by liczba Wobbego i ciepło spalania otrzymanego gazu były zgodne z przyjętymi w Polsce standardami.

Observacje prowadzono dla zakresu temperatur $-24\div 65^{\circ}\text{C}$ i ciśnień $0\div 120$ bar. Jako warunki odniesienia przyjęto $P = 101,325$ kPa i $t = 0^{\circ}\text{C}$. Wynik obliczeń dla każdej próbki został przedstawiony na osobnym wykresie. Jako kryterium poprawności wyznaczania współczynnika Z przyjęto wartość błędu $|E_d|$, która powinna być mniejsza lub równa 0,1%.

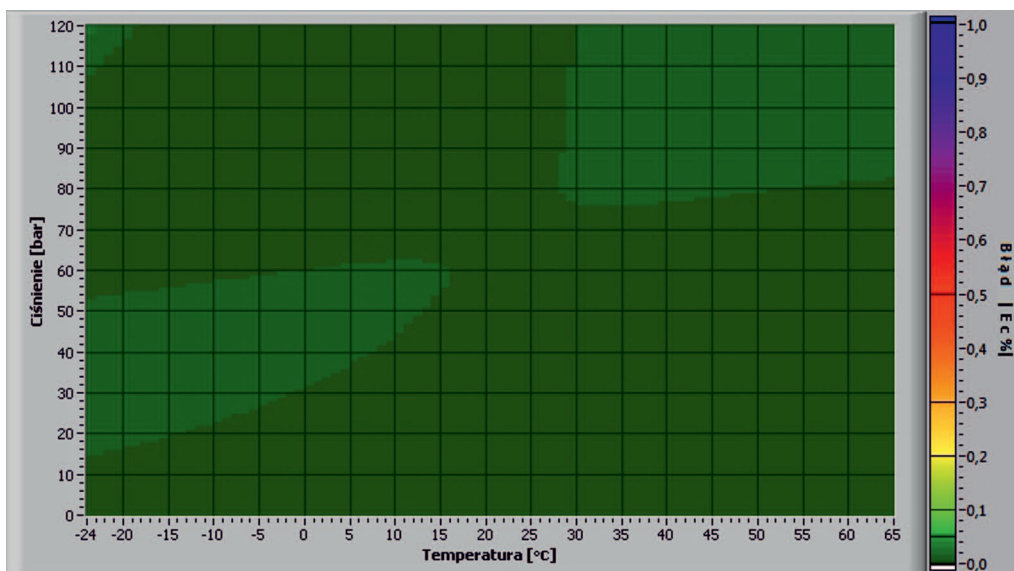
Dla metody AGA8-92DC uzyskano zaskakująco dobre rezultaty. W całym porównywanym zakresie maksymalny błąd $|E_d|$ metody nie przekroczył 0,2%, a w zdecydowanej większości przypadków mieścił się poniżej 0,05% (rysunki od 2 do 6).

Metoda SGERG-88 w porównaniu z poprzednią metodą wypadła dużo gorzej. Tutaj błąd $|E_d|$ w skrajnych przypadkach znacznie przekroczył 0,5%, mimo to, jak wynika z wykresów, można wyznaczyć węższe zakresy dla niższych wartości ciśnień, w których stosowanie tej metody nadal ma sens (rysunki od 7 do 11). Należy zauważyć, że błąd $|E_d|$ na wykresach przyjmuje najwyższe wartości poniżej temperatury $-10,15^{\circ}\text{C}$, czyli poza zakresem normalnym i rozszerzonym stosowania metody SGERG-88. Również tendencja zmian błędu $|E_d|$ we wspomnianych punktach w stosunku

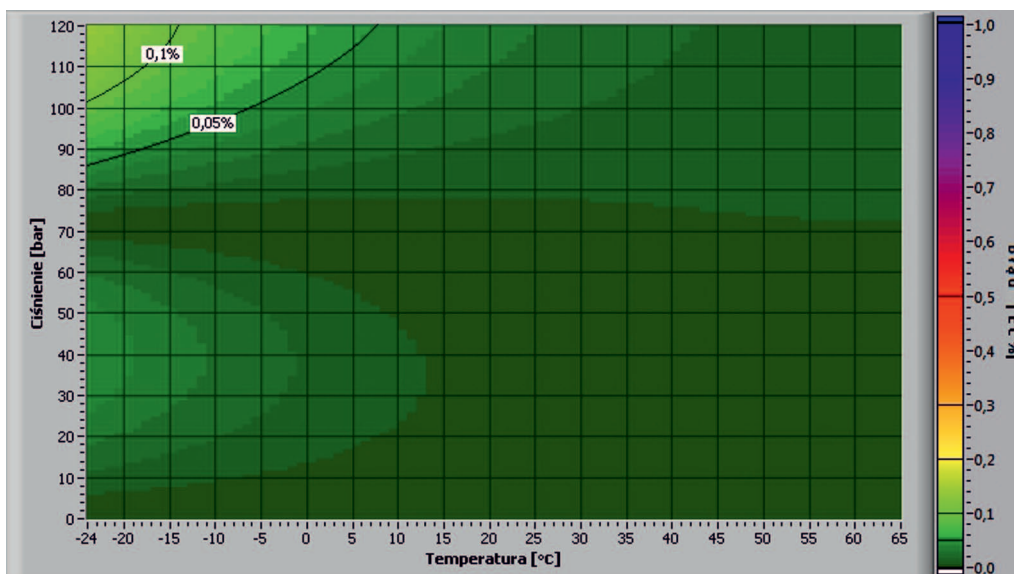
do zawartości wodoru w próbce gazu nie jest jednoznaczna. W próbce stanowi przyczynę pogorszenia się wyników metody SGERG-88. Dlatego nie można uznać, że to wzrost zawartości wodoru

Tablica 7. Składy poszczególnych próbek gazu z podwyższoną zawartością wodoru

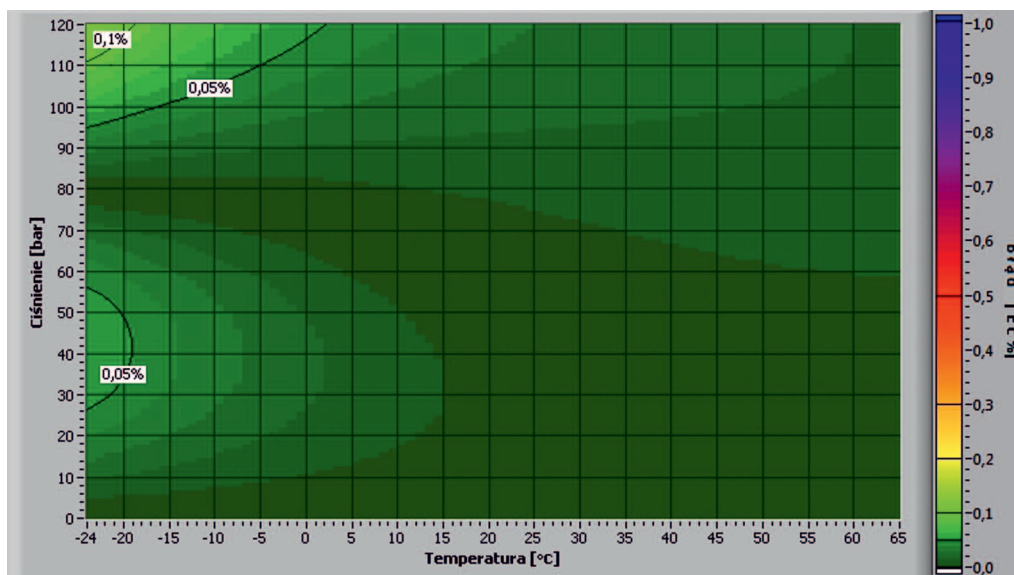
Nazwa gazu	Składniki gazu [% mol/mol]											Ciepło spalania [MJ/m ³]	Gęstość względna [-]
	metan CH ₄	etan C ₂ H ₆	propan C ₃ H ₈	n-butan n-C ₄ H ₁₀	i-butan i-C ₄ H ₁₀	n-pentan n-C ₅ H ₁₂	i-pentan i-C ₅ H ₁₂	heksan C ₆ H ₁₄	azot N ₂	tlenek węgla CO	wodór H ₂		
0,5% H ₂	96,5218	1,3658	0,3584	0,0570	0,0566	0,0099	0,0140	0,0197	1,0391	0,0577	0,5000	40,04	0,570
10% H ₂	87,3051	1,2354	0,3242	0,0516	0,0512	0,0089	0,0127	0,0178	0,9399	0,0522	10,0010	37,42	0,522
20% H ₂	77,5979	1,0980	0,2881	0,0458	0,0455	0,0079	0,0113	0,0158	0,8353	0,0464	20,0080	34,67	0,471
30% H ₂	67,9367	0,9613	0,2523	0,0401	0,0398	0,0069	0,0099	0,0139	0,7314	0,0406	29,9671	31,93	0,421
40% H ₂	58,1414	0,8227	0,2159	0,0344	0,0341	0,0059	0,0084	0,0119	0,6259	0,0348	40,0646	29,16	0,370



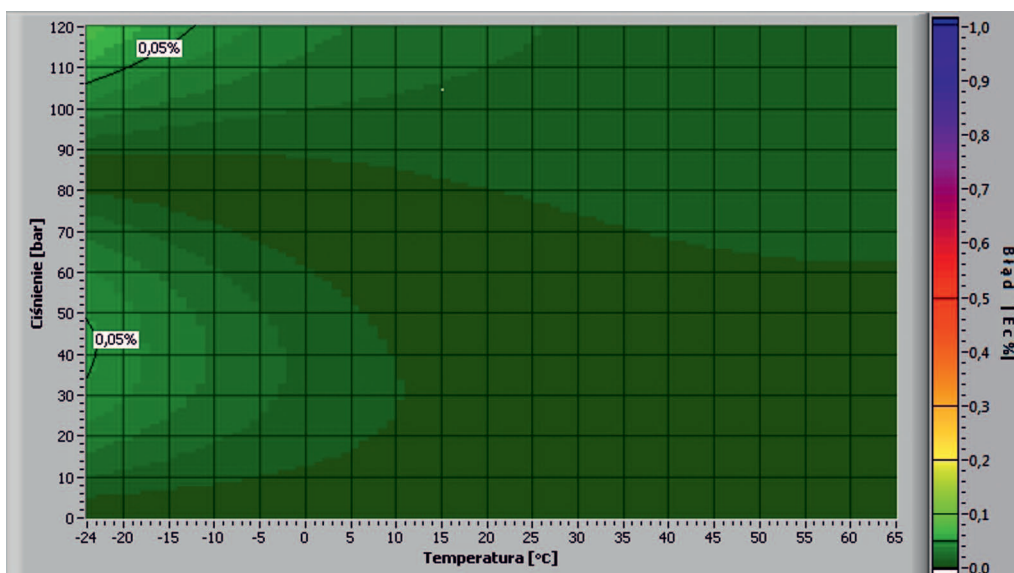
Rys. 2. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana AGA8-DC92, gaz 0,5% H₂



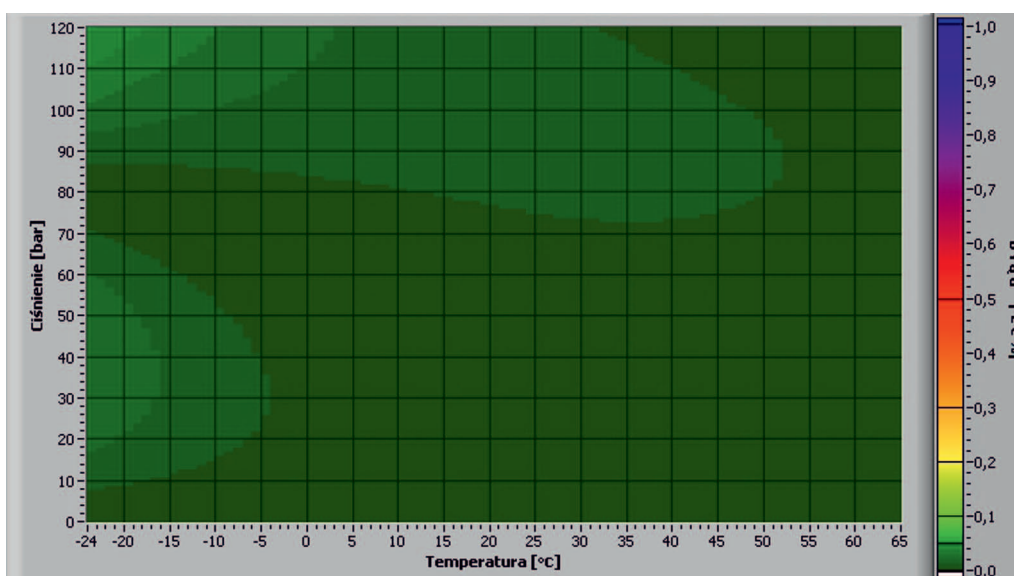
Rys. 3. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana AGA8-DC92, gaz 10% H₂



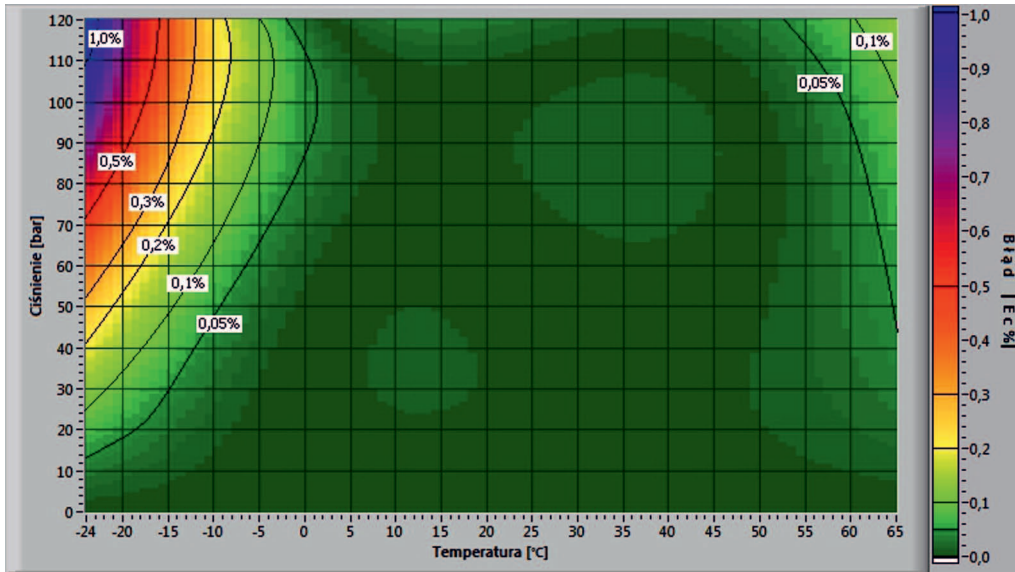
Rys. 4. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana AGA8-DC92, gaz 20% H₂



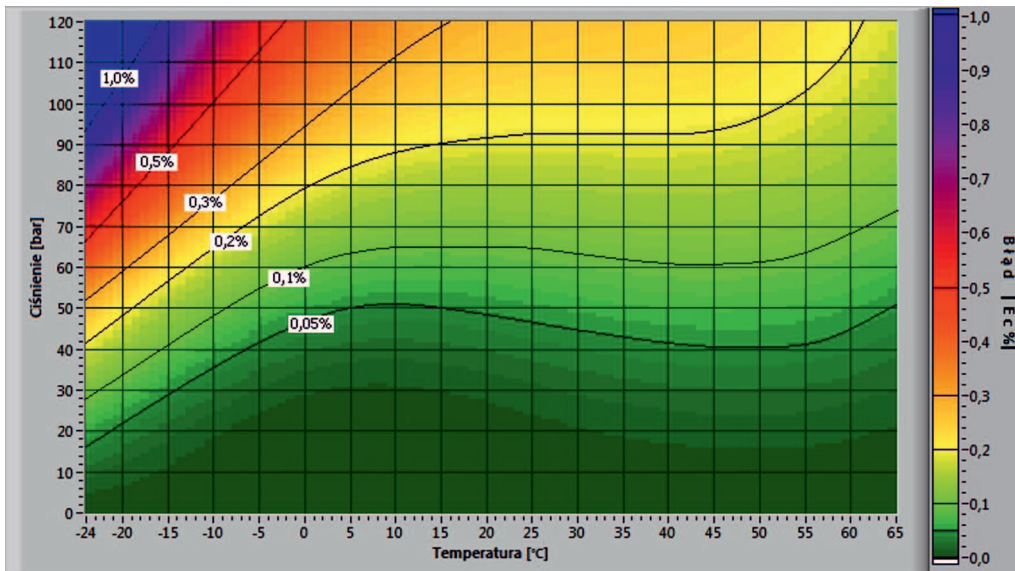
Rys. 5. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana AGA8-DC92, gaz 30% H₂



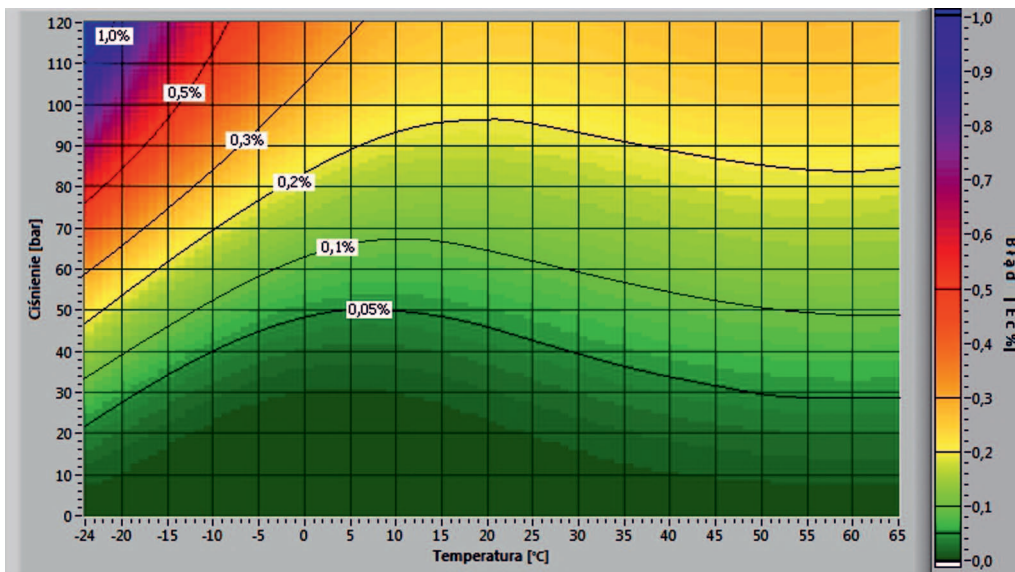
Rys. 6. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana AGA8-DC92, gaz 40% H₂



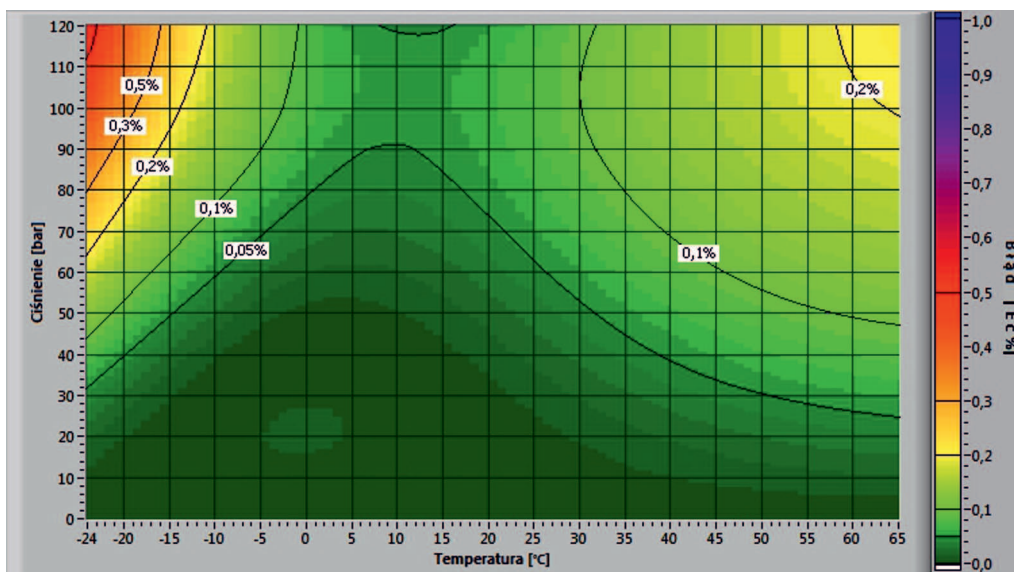
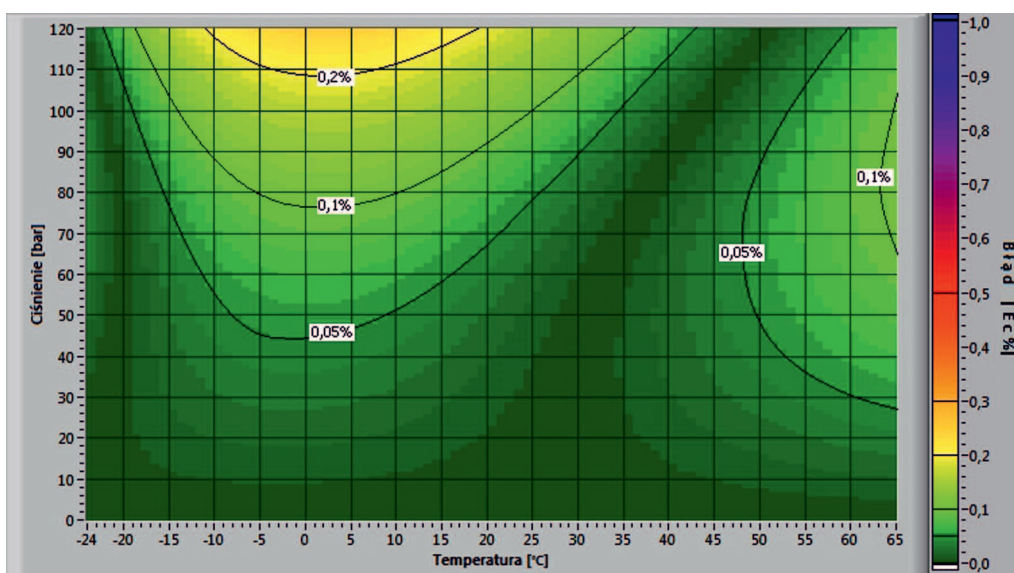
Rys. 7. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana SGERG-88, gaz 0,5% H₂



Rys. 8. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana SGERG-88, gaz 10% H₂



Rys. 9. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana SGERG-88, gaz 20% H₂

Rys. 10. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana SGERG-88, gaz 30% H₂Rys. 11. Metoda kontrolna GERG-2008, metoda badana SGERG-88, gaz 40% H₂

Podsumowanie i wnioski

Autorzy opracowujący poszczególne metody obliczeniowe tak dobierają granice ciśnienia, temperatury i składu gazu, aby wykonywane obliczenia współczynnika ściśliwości Z były poprawne dla każdego możliwego przypadku. Jak wykazały przeprowadzone symulacje, w niektórych sytuacjach znacznie wykraczających poza zalecane granice metody ta nadal zachowuje się prawidłowo, dając poprawny wynik obliczeń. W związku z tym, gdy dla metody, która aktualnie jest stosowana w przeliczniku, zalecana zawartość wodoru zostanie przekroczona, nie musi się to wiązać od razu z koniecznością zmiany metody lub wymiany całego przelicznika. Wykorzystując porównania podobne do zastosowanych w niniejszym artykule, można stwierdzić, czy aktualna metoda sobie z tym zadaniem odpowiednio poradzi.

Doskonałym przykładem jest tu metoda AGA8-92DC, w której zalecany udział molowy wodoru wynosi 10% mol/mol objętości całego gazu. Okazuje się jednak, że metoda daje zadowalające rezultaty, gdy zawartość tego składnika wzrosnie nawet do 40% mol/mol objętości gazu. Podejście takie należałoby stosować jednak niezwykle rozważnie, zawsze mając pewność, że warunki pomiaru i skład gazu nie ulegną zmianie. Należy również pamiętać, że swoboda w zakresie doboru metody istnieje tylko wtedy, gdy nie mamy do czynienia z systemem rozliczeniowym, w którym to odpowiednie dokumenty określają dostępne metody obliczeniowe, lub z przelicznikami podlegającymi jurysdykcji ustawy Prawo o miarach, tj. posiadającymi zatwierdzenie typu i legalizację pierwotną [6].

Analizując przeprowadzone obserwacje, warto jeszcze zwrócić uwagę na nieliniowość działania badanych metod obliczeniowych. W większości przypadków linie na wykresach są pofalowane, a często również wzrosty błędów wy-

stępują punktowo. Wykonując więc tego typu analizy należy stosować możliwie jak najmniejsze kroki próbkowania. Najlepiej tak jak w przypadku zamieszczonych obserwacji nie rzadziej niż co 1°C i co 1 bar.

Prosimy cytować jako Nafta-Gaz 2016, nr 5, s. 329–338, DOI: 10.18668/NG.2016.05.04

Artykuł nadesłano do Redakcji 9.12.2015 r. Zatwierdzono do druku 10.02.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Zastosowanie istniejących układów pomiarowych oraz algorytmów obliczeniowych do pomiarów objętości wodoru* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 46/GM/15, nr archiwalny: DK-4100-46/15.

Literatura

- [1] Chaczykowski M., Osiadacz A. J.: *Zarządzanie systemem gazowniczym w warunkach zróżnicowanej jakości gazu*. Przegląd Gazowniczy 2015, vol. 47, nr 3, s. 12–17.
- [2] Holewa-Rataj J., Szlęk M.: *Wpływ poprawności wyznaczenia współczynnika ściśliwości na poprawność obliczeń ciepła spalania gazu dla gazów o składzie innym niż przewidziany normą PN-EN ISO 6976:2008*. Nafta-Gaz 2015, nr 7, s. 481–486.
- [3] Kunz O., Wagner W.: *The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG-2004*. Journal of Chemical & Engineering Data 2012, vol. 57, no. 11, s. 3032–3091. DOI: 10.1021/je300655b.
- [4] Piławski M., Flisiewicz B., Pucek J.: *Gaz syntezowy z odpadów jako źródło czystej energii*. Energetyka 2012, nr 5, s. 244–245.
- [5] Starling K. E., Savidge J. L.: *Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases*. Catalog No. XQ9212. American Gas Association (AGA) Transmission Measurement Committee Report No. 8, American Petroleum Institute (API) MPMS, chapter 14.2, second edition, November 1992.
- [6] Tyszownicka M., Jaworski J.: *Wybrane problemy systemu oceny zgodności i prawnej kontroli metrologicznej na przykładzie gazomierzy i przeliczników*. Nafta-Gaz 2012, nr 12, s. 1030–1035.
- [7] Wagner W.: *Description of the Gas Version of the Software Package for the Calculation of Thermodynamic Properties from the GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures*. Lehrstuhl für Thermodynamik Fakultät für Maschinenbau 2012.

Akty prawne i normatywne

- [8] ISO 20765-2:2015 *Natural gas – Calculation thermodynamic properties. Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application*.
- [9] PN-EN ISO 12213-2:2010 *Gaz ziemny. Obliczanie współczynnika ściśliwości. Część 2: Obliczenia z zastosowaniem składu molowego*.
- [10] PN-EN ISO 12213-3:2011 *Gaz ziemny. Obliczanie współczynnika ściśliwości. Część 3: Obliczenia z wykorzystaniem właściwości fizycznych*.
- [11] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej (Dz. U. z 2008 r. Nr 3, poz. 13 z późn. zm.).
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 grudnia 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać gazomierze i przeliczniki do gazomierzy, oraz szczegółowego zakresu sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (Dz. U. z 2008 r. Nr 18, poz. 115).



Mgr inż. Maciej ŁACH
 Specjalista inżynierjno-techniczny w Zakładzie
 Metrologii Przepływów
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: maciej.lach@inig.pl