

Robert Wojtowicz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Analiza przyczyn rozbieżności określania wymienności paliw gazowych za pomocą metod teoretycznych oraz na drodze eksperymentalnej

W artykule skomentowano wyniki badań przeprowadzonych na urządzeniach domowych, służących do przygotowywania posiłków i produkcji ciepłej wody, które były zasilane mieszaninami gazu ziemnego o różnym składzie. Przeprowadzono ocenę wymienności tych mieszanin teoretycznymi metodami oceny wymienności. W artykule podjęto próbę wyjaśnienia, dlaczego rezultaty analiz z zastosowaniem teoretycznych metod oceny wymienności nie pokrywają się z wynikami badań przeprowadzonych na obecnie wykorzystywanych urządzeniach gazowych użytku domowego.

Słowa kluczowe: wymiennosc paliw gazowych, LNG, palniki gazowe.

Analysis of the causes of differences in determining the interchangeability of gas fuels with the aid of theoretical methods and experimentally

The paper presents results of tests carried out on household appliances used for food preparation and hot water production, which were powered by natural gas mixtures of different compositions. An assessment of the interchangeability of these mixtures by theoretical evaluation methods interchangeability was done. This article attempts to explain why theoretical methods to assess the interchangeability, do not coincide with the results of tests performed on household gas appliances currently in use.

Key words: interchangeability of gas fuels, LNG, gas burner.

Wstęp

Wymiennosc paliw gazowych definiuje się jako możliwość zastąpienia jednego paliwa gazowego innym, które spalając się w tych samych urządzeniach, bez potrzeby ich modyfikacji i przy tym samym ciśnieniu, nie powoduje istotnych zmian w zakresie bezpieczeństwa, sprawności oraz ogólnej charakterystyki urządzeń i istotnego wzrostu emisji zanieczyszczeń do atmosfery.

Pod pojęciem braku modyfikacji rozumie się brak konieczności jakichkolwiek zmian w budowie urządzenia gazowego oraz w konstrukcji stosowanych palników, włącznie ze zmianami średnicy dyszy, typu dyszy i ilości dopływającego powietrza pierwotnego.

Wobec tego, żeby zaistniały warunki wzajemnej wymienności paliw gazowych, muszą zostać spełnione następujące kryteria:

- obciążenie cieplne palników pozostaje bez zmian,
 - płomień jest stabilny,
 - spalanie jest higieniczne, bez wytwarzania tlenku węgla w ilościach przekraczających ustaloną wartość i bez odkładania sadzy,
 - palniki inżekcyjne zasysają odpowiednią ilość powietrza.
- Zagadnienie wymienności paliw gazowych było przedmiotem licznych prac w połowie XX wieku, np. [9, 11], a podyktowane zostało koniecznością przestawiania odbiorców z gazu miejskiego i koksowniczego głównie na gaz ziemny wysokometanowy. W tym czasie powstało wiele metod określania wymienności paliw gazowych [4]:
1. metoda Delbourga (francuska),
 2. metoda Weavera (amerykańska),
 3. metoda Caffo (włoska),

4. metoda van der Lindena (holenderska),
5. metoda Holmquista (szwedzka),
6. metoda Grumera–van Krevelena (amerykańsko-holenderska),
7. metoda Schefflera (niemiecka),
8. metoda UVP (radziecka).

Przez wiele lat wydawało się, że problem został definitywnie rozwiązany. Od tego czasu jednak znacznej zmiany uległa sytuacja na światowych rynkach gazu, jak również nastąpił istotny postęp w zakresie technologii spalania gazu. Znaczny wzrost popytu na gaz ziemny spowodował, że w wielu krajach świata sięga się po gaz o jakości odbiegającej od jakości gazu rozprowadzanego dotychczas w systemach gazowniczych tych państw. Według [1] krajowe zapotrzebowanie na gaz ziemny wzrosło z 14,1 Mtoe w 2015 roku do 15,5 Mtoe w 2050 roku. Przy wydobyciu własnym na dość stałym poziomie wynoszącym około 4,1 mld m³

wzrost zużycia będziemy musieli pokryć importem. Wobec dywersyfikacji dostaw i konieczności uniezależnienia się od gazu rosyjskiego najbardziej prawdopodobne kierunki importu to gazy ziemne z rejonu Morza Północnego oraz gazy LNG. Składy tych gazów znacznie odbiegają od składu gazu wykorzystywanego dotychczas. Wobec tego zagadnienie wymienności paliw gazowych odżywa na nowo, a interesujące staje się pytanie, na ile opracowane w drugiej połowie XX wieku metody oceny wymienności paliw gazowych pozostają aktualne w odniesieniu do obecnie używanych urządzeń gazowych oraz mieszanek gazowych. Na przestrzeni kilku ostatnich lat w INiG – PIB wykonano szereg prac, w których badano wpływ składników gazu ziemnego wysokometanowego (etanu i propanu) na jakość spalania w typowych urządzeniach gazowych użytku domowego, a uzyskane wyniki porównywano z teoretycznymi metodami oceny wymienności paliw gazowych.

Charakterystyka metod oceny wymienności paliw gazowych

Spośród wymienionych powyżej metod oceny wymienności paliw gazowych w Polsce najszersze zastosowanie znalazły:

- metoda Weavera,
- metoda Delbourga.

Metoda Weavera jest metodą obliczeniową implementowaną do urządzeń użytku domowego.

Według Weavera wymiennosc gazów określona jest przez sześć wskaźników wymienności, charakteryzujących wprowadzany gaz (gaz zastępczy – Z) względem gazu odniesienia (gaz podstawowy – P), do którego przystosowane są palniki aparatu gazowego. Wskaźniki wymienności opisują następujące właściwości gazu:

J_H – obciążenie cieplne,

J_A – zassanie powietrza pierwotnego w palnikach inżekcyjnych,

J_F – cofanie płomienia,

J_L – odrywanie płomienia,

J_I – tworzenie tlenku węgla,

J_Y – występowanie żółtych końców płomienia.

Wzory do obliczania wskaźników wymienności w metodzie Weavera oraz zakres dopuszczalnych wartości moż-

na znaleźć w następujących pozycjach literaturowych: [3, 6, 7, 10].

W metodzie Delbourga gaz charakteryzowany jest następującymi wielkościami:

- skorygowaną liczbą Wobbego – kW ,
- potencjałem spalania – D ,
- współczynnikiem tworzenia się sadzy – I_{ch} ,
- współczynnikiem powstawania żółtych końców – I_j ,
- współczynnikiem wodorowym – I_H .

Gaz jest wymienny z gazem odniesienia, jeżeli punkt charakteryzujący paliwo gazowe leży wewnątrz zakresu wymienności podanego na wykresie współrzędnych $D - kW$, a współczynniki tworzenia się sadzy, żółtych końców i wodorowy nie przekraczają dopuszczalnych wartości, określonych przez autora.

Potencjał spalania to wielkość informująca o prędkości spalania gazu. Potencjał spalania jest obliczany na podstawie składu gazu oraz przy uwzględnieniu szeregu współczynników przypisanych do odpowiednich składników.

Wzory do obliczenia poszczególnych wielkości oraz niezbędne diagramy można znaleźć w następujących pozycjach literaturowych: [6, 9].

Charakterystyka gazów użytych w badaniach

W tabelicy 1 przedstawiono średni skład gazu ziemnego wysokometanowego aktualnie dostarczanego w Polsce odbiorcom oraz składy gazów ziemnych, które w wyniku dywersyfikacji dostaw mogą pojawić się w polskim systemie gazowniczym. Według [5, 8] parametry gazu ziemnego roz-

prowadzanego w Polsce są dość stabilne; monitoring prowadzony w latach 2009–2015 pokazuje, że średnie ciepło spalania osiągnęło wartość około 40 MJ/m³, natomiast górna liczba Wobbego około 53 MJ/m³ (rysunek 1). Analizując zawarte w tabelicy 1 dane, można zauważyć, że gazy pocho-

Tablica 1. Składy gazów ziemnych

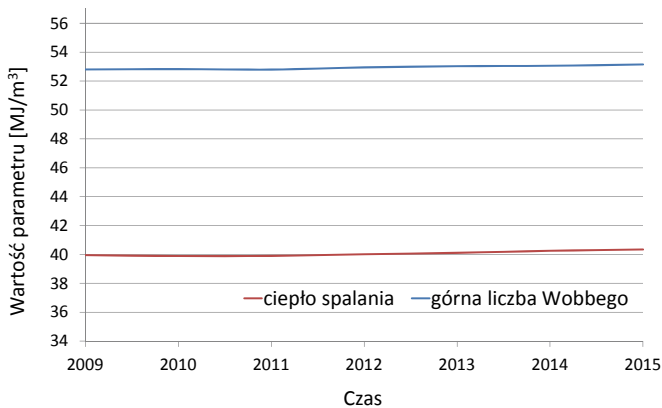
Gaz	Skład						H_s	W_s	ρ	d	
	metan	etan	propan	C ₄₊	azot	CO ₂					
	% mol						MJ/m ³	MJ/m ³	kg/m ³	–	
Gaz ziemny*	97,73	0,79	0,18	0,09	1,2	0,02	39,80	52,83	0,734	0,567	
Gazy LNG z różnych źródeł	Brunei	89,76	4,75	3,20	2,29	–	–	45,40	56,50	0,835	0,646
	Trynidad	96,14	3,40	0,39	0,07	–	–	41,17	54,22	0,746	0,578
	Algieria	88,83	8,61	2,18	0,38	–	–	44,15	55,85	0,808	0,625
	Indonezja	90,18	6,41	2,38	1,03	–	–	44,22	55,88	0,809	0,626
	Nigeria	90,53	5,05	2,95	1,47	–	–	44,57	56,06	0,817	0,632
	Katar	89,27	7,07	2,50	1,16	–	–	44,61	56,09	0,818	0,633
	Abu Dhabi	85,96	12,57	1,33	0,14	–	–	44,61	56,10	0,818	0,632
	Malezja	87,64	6,88	3,98	1,50	–	–	45,78	56,71	0,843	0,652
	Australia	86,41	9,04	3,60	0,95	–	–	45,69	56,67	0,841	0,650
	Oman	86,61	8,31	3,32	1,76	–	–	46,06	56,86	0,848	0,656
Gazy M.P.**	Miesz. 1	73,07	22,65	0,84	0,08	0,96	2,39	46,00	54,84	0,909	0,704
	Miesz. 2	89,74	5,89	2,20	1,19	0,28	0,70	43,83	55,03	0,820	0,634

Uwaga: Wartości wielkości fizykochemicznych podano dla warunków odniesienia $t = 0^\circ\text{C}$ i $p = 1013,25$ mbar.

* Średni skład gazu ziemnego wysokometanowego używanego aktualnie w Polsce [8].

** Gazy pochodzące ze złóż na Morzu Północnym [8].

dzące z rejonu Morza Północnego, a także gazy LNG [2] mogą zawierać kilka, a nawet kilkadziesiąt razy więcej węglowodorów wyższych niż gaz ziemny wysokometanowy. I tak udział procentowy etanu w tych gazach może przekraczać 22%, a udział propanu może sięgać nawet 4%.



Rys. 1. Zmienność ciepła spalania i górnej liczby Wobbego gazu ziemnego wysokometanowego w Polsce w latach 2009–2015 [5, 8]

Analizując powyższe uwarunkowania, do badań w ramach niniejszej pracy przyjęto następujące mieszaniny gazowe:

- gaz ziemny, jako gaz odniesienia dla sprawdzenia parametrów znamionowych badanych urządzeń i ewentualnego korygowania nastaw tak, aby zmiana gazu następowała zawsze przy nastawach znamionowych, które w dalszych badaniach nie ulegają zmianom;

- mieszanki o zwiększającej się zawartości etanu i propanu, symulujące składy gazów z Morza Północnego i LNG:
 - 90% metanu + 7% etanu + 3% propanu (oznaczenie gazu G73),
 - 80% metanu + 15% etanu + 5% propanu (oznaczenie gazu G155),
 - 76% metanu + 20% etanu + 4% propanu (oznaczenie gazu G204).

Przyjęto również, że istotnymi parametrami, których zmiany w urządzeniach należy zbadać ze względu na inną jakość gazu, będą:

- obciążenie cieplne przy ciśnieniu nominalnym (ciśnienie nominalne – ciśnienie, przy którym urządzenia działają w warunkach znamionowych, jeśli są zasilane odpowiednim gazem odniesienia);
- stężenia CO przy ciśnieniu nominalnym i maksymalnym oraz przy obciążeniu minimalnym (ciśnienie maksymalne – najwyższe ciśnienie dla odpowiedniego gazu odniesienia, jakim urządzenie może być zasilane);
- stabilność płomienia:
 - odrywanie płomienia przy ciśnieniu maksymalnym,
 - cofanie płomienia przy ciśnieniu minimalnym i nastawniku mocy ustawionym w położeniu minimalnym (ciśnienie minimalne – najniższe ciśnienie dla odpowiedniego gazu odniesienia, jakim urządzenie może być zasilane).

Procedury badawcze dobierane były z norm zharmonizowanych [11, 12, 13], opracowanych dla poszczególnych grup urządzeń, do których zaliczały się badane urządzenia.

Tablica 2. Parametry gazu ziemnego oraz gazów o podwyższonej zawartości etanu i propanu

Parametr		Jednostka	Oznaczenia gazów oraz wartość parametru			
			2E	G73	G155	G204
Skład gazu	metan	%	97,7300	90	80	76
	etan	%	0,7870	7	15	20
	propan	%	0,1787	3	5	4
	n-butan	%	0,0271	–	–	–
	i-butan	%	0,0282	–	–	–
	n-pentan	%	0,0240	–	–	–
	i-pentan	%	–	–	–	–
	azot	%	1,2060	–	–	–
	dwutlenek węgla	%	0,0190	–	–	–
Ciepło spalania, H_s		MJ/m ³	39,78	43,81	47,47	48,38
Wartość opałowa, H_i		MJ/m ³	35,86	39,61	43,03	43,88
Liczba Wobbego (górna), W_s		MJ/m ³	52,82	55,66	57,62	58,10
Liczba Wobbego (dolna), W_i		MJ/m ³	47,62	50,32	52,22	52,69
Gęstość, ρ		kg/m ³	0,733	0,801	0,878	0,897
Gęstość względna, d		–	0,567	0,619	0,679	0,694

Uwaga: Wartości wielkości fizykochemicznych podane dla warunków odniesienia dla procesu spalania i objętości: $T_1 = 25^\circ\text{C}$; $T_2 = 0^\circ\text{C}$; $p_1 = p_2 = 1013,25 \text{ hPa}$, 2E – gaz ziemny wysokometanowy.

Wybór urządzeń do badań

W urządzeniach gazowych stosowane są następujące konstrukcje palników:

- palniki dyfuzyjne – zmieszanie powietrza i gazu następuje w trakcie spalania, po wypływie gazu z dyszy. Klasyczne palniki z dyfuzją naturalną spotykane są obecnie bardzo rzadko (praktycznie jedynie w starych grzejnikach wody PG-4 jako palniki pilotujące), natomiast do grupy palników z dyfuzją wymuszoną można zaliczyć większość palników przemysłowych typu „rura w rurze”, z wymuszonym dopływem powietrza;
- palniki kinetyczno-dyfuzyjne – charakteryzują się dwuetapowym procesem mieszania – w pierwszym etapie następuje zmieszanie gazu z powietrzem pierwotnym, którego ilość nie przekracza przeważnie 60% ilości stechiometrycznej, wynikającej ze strumienia gazu. Tak przygotowana mieszanka wypływa z otworów palnikowych i ulega zapaleniu. W trakcie spalania dostarczane jest na drodze dyfuzji powietrze wtórne i realizowany jest drugi etap mieszania. Na tej zasadzie konstrukcyjnej oparta jest większość palników wykorzystywanych w sprzęcie gospodarstwa domowego i urządzeniach komunalnych;
- palniki kinetyczne – palniki, w których następuje pełne wymieszanie gazu i powietrza przed wypływem mieszanki do strefy spalania. Palniki te stosowane są w najnowszych rozwiązaniach kotłów kondensacyjnych (z tzw. palnikami premix). Ze względu na zawansowanie technologiczne

urządzeń wykorzystujących tego typu palniki i stosowane systemy sterowania bardzo często istnieje możliwość automatycznego regulowania ilości powietrza do spalania (np. za pomocą sondy λ) i dlatego urządzenia te nie będą czułe na zmiany jakości gazu w przewidywanym zakresie.

W badaniach skupiono się na urządzeniach z palnikami kinetyczno-dyfuzyjnymi. Biorąc pod uwagę cel badań, czyli sprawdzenie wpływu składu gazu na pracę palnika, zainteresowanie to wynika z następujących przyczyn:

- W tego typu palnikach nie ma możliwości regulowania ilości powietrza do spalania w przypadku zmiany składu gazu. Ilość zasysanego powietrza do spalania związana jest z rozmiarem i konstrukcją zastosowanej dyszy gazowej. W związku z tym palniki te są samosterowne, ale w ograniczonym zakresie liczby Wobbego.
- Istnieje kilka konstrukcji palników kinetyczno-dyfuzyjnych, w zależności od ich miejsca pracy (typu urządzenia, w którym są zamontowane).
- W palnikach tych jakość spalania uzależniona jest od obciążenia cieplnego, jakie dla danej wielkości palnika przewidział jego producent. Wśród producentów urządzeń istnieje tendencja do maksymalizowania mocy palników (inspirowana względami marketingowymi), co może skutkować wchodzeniem w obszar gwałtownego wzrostu stężenia tlenu węgla, gdy obciążenie cieplne palnika wzrośnie ze względu na zmianę składu gazu.

- Palniki te są czułe na warunki użytkowania i konserwacji.

Badania wpływu składu gazu ziemnego wysokometanowego na jakość spalania przeprowadzono na dwóch grupach urządzeń użytku domowego: pierwsza grupa to urządzenia służące do przygotowania posiłków (płyty i kuchnia gazowa), natomiast druga to urządzenia wykorzystywane do przygotowania ciepłej wody do celów grzewczych i/lub sanitarnych (gazowe przepływowe podgrzewacze wody oraz kotły gazowe).

Do pierwszej grupy wytypowano 4 urządzenia z palnikami „kubelkowymi” oraz 1 urządzenie z palnikami „fajkowymi”. W palnikach „kubelkowych” pierwszego typu (fotografia 1) powietrze pierwotne do spalania zasysane jest z dna płyty palnikowej, stąd palniki te nie mogą być montowane poniżej płyty („utopione” w płycie), a najlepiej pracują w modnych ostatnio szklanych lub ceramicznych płaskich płytach palnikowych. Regulacja dopływu powietrza pierwotnego ze względu na rodzaj gazu realizowana jest poprzez specjalne konstrukcje dysz (z podwójnym lub nawet potrójnym nawiercaniem i odpowiednio dobraną wysokością).

Drugi typ palników „kubelkowych” charakteryzuje się tym, że jego „kubelkowa” część, pełniąc rolę inżektora, wytłoczona jest bezpośrednio w płycie palnikowej (fotografia 2).

Palniki fajkowe (fotografia 3) cechują się tym, że następuje w nich lepsze mieszanie gazu z powietrzem pierwotnym, z racji posiadania wydłużonego dyfuzora.

su głowicy palnika dopływa już mieszanka powietrza pierwotnego i gazu, a nie jak w przypadku typowych palników „kubelkowych” – sam gaz. Palniki te zasysają więcej powietrza do spalania niż palniki „kubelkowe”, co skutkuje tym, że są bardziej podatne na niestabilną pracę, ale mają niższy poziom emisji tlenku węgla niż palniki „kubelkowe”. Łącznie przebadano 20 palników 5 różnych producentów, a wytypowane konstrukcje, według wiedzy autora, stanowią około 90% palników użytkowanych i sprzedawanych w płytach i kuchniach gazowych.

Drugą grupą badanych urządzeń były urządzenia użytku domowego służące do przygotowania ciepłej wody do celów grzewczych i/lub sanitarnych. W tym przypadku również wytypowano urządzenia z palnikami kinetyczno-dyfuzyjnymi, a dodatkowym kryterium było zapewnienie różnorodności konstrukcji urządzeń ze względu na sposób doprowadzenia powietrza do spalania i odprowadzenia spalin. W związku z powyższym badania prowadzono na:

- kotle grzewczym gazowym, dwufunkcyjnym, wiszącym z zamkniętą komorą spalania – kocioł nr 1,
- kotle grzewczym gazowym, dwufunkcyjnym, wiszącym z otwartą komorą spalania – kocioł nr 2,
- gazowym przepływowym podgrzewaczem wody z zamkniętą komorą spalania – podgrzewacz nr 1,
- gazowym przepływowym podgrzewaczem wody z otwartą komorą spalania – podgrzewacz nr 2.



Widok ogólny



Pierścień płomieniowy bez nakrywki



Korpus dyfuzora

Fot. 1. Palnik „kubelkowy” pierwszego typu



Widok ogólny



Pierścień płomieniowy bez nakrywki



Korpus dyfuzora

Fot. 2. Palnik „kubelkowy” drugiego typu



Widok ogólny



Pierścień płomieniowy bez nakrywki



Wylot dyfuzora

Fot. 3. Palnik „fajkowy”

Wyniki analiz i badań oraz ich interpretacja

Metoda Weavera

Tablica 3. Ocena wymienności gazów G73, G155 i G204 z gazem 2E

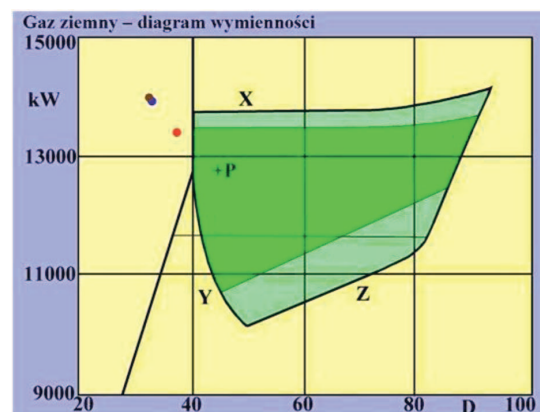
Symbol	Nazwa wskaźnika	Wartość wskaźnika		Wartości uzyskane		
		optymalna	graniczna	oznaczenie gazu		
				G73	G155	G204
J_H	Wskaźnik obciążenia cieplnego	1	0,9÷1,1	1,05	1,09	1,10
J_A	Wskaźnik powietrza pierwotnego	1	0,8÷1,2	1,05	1,09	1,10
J_L	Wskaźnik odrywania płomienia	1	0,64÷1	1,09	1,16	1,18
J_F	Wskaźnik cofania płomienia	0	≤ 0,08	-0,04	-0,06	-0,06
J_Y	Wskaźnik występowania żółtych końców	0	≤ 0,14	0,05	0,09	0,10
J_I	Wskaźnik tworzenia tlenków węgla	0	≤ 0,05	0,07	0,12	0,13

Metoda Delbourga

Tablica 4. Wartości wskaźników charakteryzujących gazy według metody Delbourga

Parametr oceniany	Symbol	Wartość wskaźnika	Wartości uzyskane		
			G73	G155	G204
Skorygowana liczba Wobbego	kW	–	13 290	13 921	14 065
Potencjał spalania	D	–	38,1	36,4	36
Wskaźnik żółtych końców	I_j	< 230	127	121	120
Wskaźnik tworzenia się sadzy	I_{Ch}	< 160	127	121	120
Wskaźnik wodorowy	I_H	≤ 10	0	0	0

W obszarze ciemnozielonym występuje wymienność gazów bez potrzeby modyfikacji urządzenia i bez zmiany ciśnienia gazu. W przypadku utrzymywania przy wymianie gazu jednakowego obciążenia przez odpowiednią zmianę ciśnienia gazu lub przez zmianę ciśnienia gazu i wyregulowanie dopływu powietrza obszar wymienności rozszerza się o pola zaznaczone kolorem jasnozielonym.



Rys. 2. Umieszczenie na diagramie wymienności Delbourga gazów G73, G155 i G204

● – gaz G73 ● – gaz G155 ● – gaz G204

Legenda:

kW – skorygowana liczba Wobbego

D – potencjał spalania

X – obszar oznaczający niehigieniczne spalanie

Z – obszar oznaczający cofanie się płomienia

Y – obszar oznaczający odrywanie się płomienia

Interpretacja wyników badań i analiz

Patrząc na wyniki analiz wymienności badanych gazów (G73, G155, G204) z gazem ziemnym wysokometanowym przeprowadzonych metodami Weavera i Delbourga, możemy stwierdzić, że obie metody dają podobne rezultaty: rozpatrywane gazy nie mogą być wymienne. W metodzie Weavera dla wszystkich gazów dwa parametry nie mieszczą się w granicach określonych przez autora. Są to wskaźnik odrywania płomienia oraz wskaźnik tworzenia tlenku węgla (tablica 3).

W metodzie Delbourga, o ile wskaźnik żółtych końców, wskaźnik tworzenia się sadzy i wskaźnik wodorowy świadczą o tym, że gazy G73, G155 i G204 mogą być wymienne z gazem ziemnym wysokometanowym (tablica 4), to umiejscowienie tych gazów na diagramie wymienności dla gazów ziemnych świadczy o tym, że jest odwrotnie i wymienne nie są.

Gazy te leżą w obszarze, który mógłby przemawiać za tym, że w trakcie spalania tych gazów w urządzeniach występuje zjawisko odrywania się płomienia (w trakcie pomiarów nie zaobserwowano jednak takiego zjawiska).

Analizując zawartość tlenku węgla w spalinach, w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny, uzyskanych w trakcie badania kotłów gazowych i gazowych przepływowych podgrzewaczy wody, w żadnym badanym urządzeniu nie zaobserwowano przekroczenia dopuszczalnej granicy, którą określono na 1000 ppm. Jest to graniczna wartość emisji CO wymagana przez normy odniesienia [11, 12, 13] przy badaniach typu.

W przypadku badań jakości spalania przeprowadzonych na palnikach płyt i kuchni gazowych tylko w jednym przypadku (na palniku „kubelkowym” typu drugiego o mocy 3,5 kW) nastąpiło przekroczenie dopuszczalnej granicznej wartości tlenku węgla (1000 ppm). Zaobserwowano je w przypadku wszystkich badanych gazów. Należy jednak podkreślić, że palnik ten został wycofany z produkcji ze względu na jego niestabilną pracę (zostało to zaobserwowane w trakcie badań typu i po konsultacjach producent podjął decyzję o zaprzestaniu produkcji). W przypadku pozostałych palników „kubelkowych” typu drugiego uzyskane wartości tlenku węgla są zadowalające.

Przeprowadzone badania stabilności płomienia pokazały, że badane gazy nie powodują pogorszenia stabilności płomieni palników branych pod uwagę urządzeń. Są to wyniki o tyle spodziewane, że w przypadku tych gazów mieliśmy do czynienia z podwyższeniem liczby Wobbego, co miało wpływ raczej na polepszenie pracy, ze względu na odrywanie płomienia i rozprzestrzenianie się płomienia na palniku (większa szybkość spalania etanu i propanu względem metanu).

Analizując wartości obciążeń cieplnych, widać jednoznacznie, że dla mieszanin gazowych o liczbie Wobbego wyższej niż liczba Wobbego gazu, na który były one zaprojektowane, prawie we wszystkich przypadkach nastąpił, co jest naturalne,

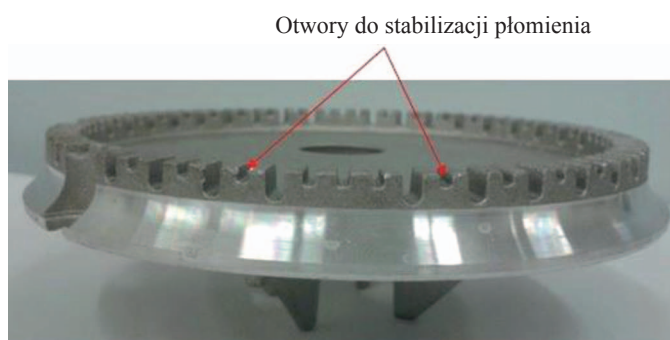
wzrost obciążenia cieplnego, lecz nie stwarzało to istotnych zagrożeń podczas eksploatacji (brak zjawiska uciążliwego wylączenia się urządzenia w wyniku nadmiernego wzrostu temperatury wody, nie zaobserwowano wzrostu stężenia tlenku węgla ponad założoną wartość graniczną). Bardzo interesujące są wyniki badań przepływowego ogrzewacza wody nr 1, z zamkniętą komorą spalania. W tym przypadku uzyskano bardzo stabilne wielkości obciążeń cieplnych, mimo zmiennych parametrów gazu zasilającego. Jest to rezultat wyposażenia tego urządzenia w stabilizator ciśnienia gazu oraz regulator temperatury wody. Podzespoły te, jak widać, są w stanie utrzymywać stałe parametry pracy urządzenia grzewczego pomimo dość dużych zmian składu gazu, którym to urządzenie było zasilane. Zamknięta komora spalania i dostarczanie powietrza do spalania wspomagane wentylatorem powodują, że ilość powietrza jest stała, co daje stabilne warunki spalania przy ustabilizowanym obciążeniu cieplnym. W przypadku grzejnika wody istotne było, że nastawy temperatury wody (55°C) i strumienia wody (6 l/min) wymagały obciążenia cieplnego poniżej wartości nominalnej, co zapewniało stabilną regulację. Tego typu rozwiązanie z modulacją obciążenia cieplnego palnika jest charakterystyczne dla większości modeli kotłów kondensacyjnych i podgrzewaczy wody z zamkniętą komorą spalania wprowadzanych obecnie na polski rynek.

Zarówno w metodzie Weavera, jak i Delbourga parametrem, który nie mieści się w granicach wymienności określonych przez autorów metod, jest wskaźnik odrywania się płomienia. Przyczyn tego stanu rzeczy należy upatrywać przede wszystkim w zmianie konstrukcji palników gazowych, które były używane w momencie tworzenia tych metod. Zasadnicza różnica polega na tym, że w obecnie produkowanych palnikach zastosowano tzw. stabilizację płomienia. Konstrukcyjnie polega to na tym, że w palnikach wykorzystano dodatkowe otwory (szczeliny), mniejsze od głównych otworów (szczelin) płomykowych, które zapewniają zarówno lepsze przeniesienie płomienia, jak i pomagają w utrzymywaniu się płomienia na głównym otworze płomykowym. Przykład palnika gazowego stosowanego w płytach i kuchniach gazowych posiadającego otwory do stabilizacji płomienia pokazano na rysunku 3.

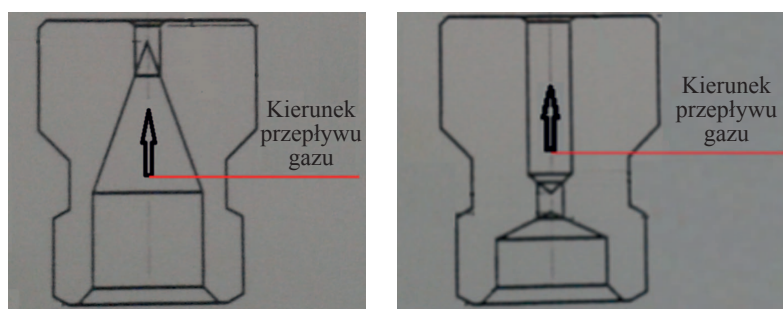
Inna zasadnicza różnica wynika z faktu użycia tzw. dysz gazowych nawiercanych o zwiększającej się średnicy dyszy w stronę kierunku wypływu z niej gazu (rysunek 4).

Tego typu dysze stosuje się głównie w przypadku gazów ziemnych wysokometanowego i zaazotowanych.

Niestabilność płomienia pojawia się w momencie różnej szybkości wypływu mieszanki i szybkości spalania. Warunkiem stabilności płomienia jest istnienie zbioru punktów, gdzie lokalna szybkość wypływu mieszanki jest równa szybkości spalania (rysunek 5).



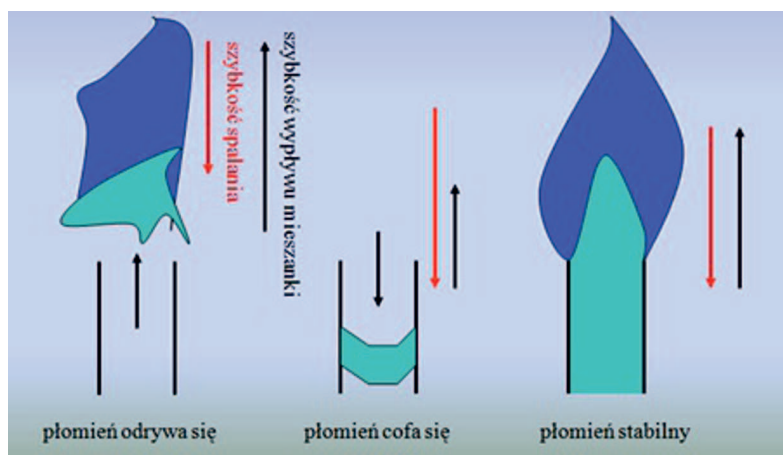
Rys. 3. Widok części palnika gazowego z otworami do stabilizacji płomienia



Dysza płaska

Dysza nawiercana

Rys. 4. Różne konstrukcje dysz gazowych



Rys. 5. Wpływ prędkości spalania i szybkości wypływu mieszanki na kształt płomienia

W latach, w których opracowywano omawiane metody oceny wymienności paliw gazowych, w powszechnym użytku były palniki z regulowaną przesłoną inżekcyjną powietrza pierwotnego do spalania. Wyniki porównań wymienności ga-

zów powyższymi metodami były wykorzystywane w opracowywaniu instrukcji użytkowania urządzeń gazowych do wskazania nastaw szczeliny inżekcyjnej. Zmiana nastawień tej szczeliny przy zmianie gazu zapobiegała zjawisku odrywania lub cofania się płomienia.

W obecnie użytkowanych palnikach rolę regulacji ilości powietrza pierwotnego przejęły konstrukcje dysz, w których zróżnicowanie średnicy otworów wylotowych (nawiercanie wielostopniowe – dwu- lub więcej) przejęło rolę regulowanej szczeliny. Taka konstrukcja dyszy, a co za tym idzie i palnika, wykazuje się większą elastycznością na zmianę składu gazu, co skutkuje tym, że palniki można zasilać gazami o dość dużej zmienności wartości liczby Wobbe'go bez potrzeby ich modyfikacji.

Opisaną powyżej różnicą między konstrukcją palników stosowanych w momencie opracowywania metod oceny wymienności a współczesnymi konstrukcjami można tłumaczyć zauważone rozbieżności w ocenie stabilności płomienia pomiędzy wynikami badań urządzeń a rezultatami analiz z wykorzystaniem teoretycznych metod oceny wymienności.

W metodzie oceny wymienności metodą Weavera również wskaźnik tworzenia się tlenku węgla przekracza wartość graniczną określoną przez autora. Praktyka pokazuje, że gdy na palniku występuje zjawisko odrywania się płomienia, automatycznie zauważalne jest pogorszenie jakości spalania i wzrost emisji tlenku węgla. Wiąże się to z tym, że podczas zjawiska odrywania się płomienia szybkość wypływu mieszanki jest większa od szybkości spalania, w związku z czym następuje obniżenie temperatury płomienia w jego części i w tym obszarze mamy podwyższoną propagację tlenku węgla. Wobec powyższego, gdy przy opracowywaniu metody wymienności zaobserwowano zjawisko odrywania się płomienia, występowało również spalanie niecałkowite. W związku z tym, co pokazały przeprowadzone badania, na palnikach nowej konstrukcji brak zjawiska odrywania się płomienia eliminuje również zwiększoną podatność na występowanie tlenku węgla w spalinach.

Podsumowanie

Wyniki badań przeprowadzonych na wytypowanych urządzeniach świadczą o tym, że rozpatrywane gazy o podwyższonej zawartości węglowodorów wyższych (etanu i propanu) mogą być wymienne z gazem ziemnym wysokometanowym rozprowadzanym obecnie w Polsce. Można zatem

stwierdzić, że gazy z kierunku Morza Północnego czy też gazy LNG nie powinny powodować pogorszenia bezpieczeństwa (zwiększona zawartość tlenku węgla w spalinach, niestabilna praca palników) w stopniu wykraczającym poza zakres określony normami.

Niestety zupełnie odmienny wniosek nasuwa się po przeanalizowaniu wyników analiz przeprowadzonych teoretycznymi metodami oceny wymienności paliw gazowych, czyli metodą Weavera i metodą Delbourga. Według tych metod tej wymienności nie ma.

Najbardziej rozpowszechnione i najczęściej stosowane w Polsce metody oceny wymienności, tzn. metoda Weavera i metoda Delbourga, zostały opracowane w latach 50. XX wieku i oparto je na gazach i urządzeniach wykorzystywanych w tamtym okresie. Od tego czasu nastąpił jednak istotny postęp w zakresie technologii spalania (nowe konstrukcje palników), zmieniły się też gazy spalane w urządzeniach gazowych. I właśnie w tym należy upatrywać powodów, dla których wyniki badań laboratoryjnych nie pokrywają się z wynikami analiz przeprowadzonych metodami Weavera i Delbourga.

Metody oceny wymienności mają służyć do szybkiej oceny możliwości zastąpienia jednych gazów innymi, bez ko-

nieczności prowadzenia kosztownych i długotrwałych badań na urządzeniach. Uzyskane wyniki badań dowodzą, że rozpatrywane metody oceny wymienności straciły na aktualności i należy podjąć prace badawcze nad ich modernizacją lub opracowaniem nowych metod.

Modernizacja metody Weavera mogłaby polegać na rozszerzeniu dopuszczalnych granic zmienności wskaźnika odrywania się płomienia i wskaźnika tlenku węgla, tak aby dostosować je do obecnie wykorzystywanych konstrukcji palników gazowych. W wyniku modernizacji wskazane byłoby podzielenie dopuszczalnego zakresu zmienności tych wskaźników, w zależności od typu konstrukcji palnika.

W metodzie Delbourga weryfikacji należałoby poddać wykres wymienności dla gazów ziemnych, opracowanie go na nowo z uwzględnieniem nowych konstrukcji palników gazowych i w odniesieniu do współcześnie stosowanych mieszanek gazów ziemnych.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 6, s. 422–430, DOI: 10.18668/NG.2016.06.05

Artykuł nadesłano do Redakcji 11.01.2016 r. Zatwierdzono do druku 15.03.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Krytyczna analiza wybranych metod oceny wymienności gazów w oparciu o dotychczas przeprowadzone badania* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0050/GU/15, nr archiwalny: DK-4100-50/15.

Literatura

- [1] Ciecchanowska M.: *Polityka energetyczna Polski do 2050 roku*. Nafta-Gaz 2014, nr 11, s. 839–842.
- [2] Electric Power Research Institute: *Fuel Composition Impacts on Combustion Turbine Operability*. Technical Update, March 2006.
- [3] Halchuk-Harrington R., Wilson R. D.: *Aga Bulletin #36 and Weaver interchangeability methods: yesterday's research and today's challenges*. American Gas Association, Operating Section Proceedings 2006, vol. 2.
- [4] Hypr I.: *Prispevek k soucasnemu vtvoji zeimennostnich metod. Paliva* 1965, nr 45.
- [5] Schuster T., Bogucki A.: *Trzy lata monitoringu parametrów cieplnych gazu ziemnego w krajowym systemie dystrybucyjnym*. Nafta-Gaz 2011, nr 12, s. 909–919.
- [6] Sperski B.: *Gazownictwo. Część 1*. Kraków, Wydawnictwa AGH, 1986.
- [7] Weaver E. R.: *Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases*. Journal of Research of the National Bureau of Standards 1951, vol. 46, no. 3, s. 213–245.
- [8] Wojtowicz R.: *Wpływ składników gazu ziemnego wysokometanowego (etanu i propanu) na jakość spalania w kotłach gazowych i gazowych przepływowych ogrzewaczach wody – analiza porównawcza teoretycznych metod oceny wymienności z wynikami pomiarów*. Praca statutowa INiG – PIB, Kraków 2011, nr zlecenia: 34/GU, nr archiwalny: DK-4100-34/11.
- [9] Zieleniewski R.: *Zamiennosc gazów w eksploatacji*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 1962, nr 7, s. 254.
- [10] Zieleniewski R., Kozakiewicz K.: *Aparaty i urządzenia gazowe*. Warszawa, Arkady, 1981.
- [11] Zieleniewski R., Kozakiewicz K.: *Metody określania wymiennosci gazów*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 1962, nr 11, s. 418.

Akty prawne i normatywne

- [12] PN-EN 26:2007 *Gazowe przepływowe ogrzewacze wody do celów sanitarnych, wyposażone w palniki atmosferyczne*.
- [13] PN-EN 30-1-1:2008 *Domowe urządzenia gazowe do gotowania i pieczenia – Część 1-1: Bezpieczeństwo – Postanowienia ogólne*.
- [14] PN-EN 677:2007 *Kotły centralnego ogrzewania opalane gazem – Specjalne wymagania dotyczące kotłów kondensacyjnych o znamionowym obciążeniu cieplnym nieprzekraczającym 70 kW*.



Mgr inż. Robert WOJTOWICZ
Kierownik Laboratorium Badań Urządzeń Gazowniczych i Grzewczych.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: robert.wojtowicz@inig.pl