

Mirosław UZDOWSKI

## WŁAŚCIWOŚCI GAZU ZIEMNEGO JAKO PALIWA DO ZASILANIA TŁOKOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono niektóre właściwości i cechy gazu ziemnego oraz możliwości jego wykorzystania, jako paliwa do zasilania silników pojazdów.*

**Słowa kluczowe:** gaz ziemny, właściwości, zasilanie, tłokowe silniki spalinowe

### WSTĘP

Gaz ziemny z uwagi na swoje niekwestionowane walory często nazywany jest paliwem XXI w. Po okresach dominacji węgla i ropy naftowej można zaobserwować zmiany w strukturze zużycia paliw z większym wykorzystaniem gazu ziemnego. Wysoka pozycja gazu zaczęła zaznaczać się od połowy XX wieku. W polskim przemyśle zużywany jest przede wszystkim do bezpośredniego grzejnictwa wysokotemperaturowego w procesach przetwórczych, przy których wymagana jest ciągła regulacja i automatyzacja (hutnictwo, przemysł maszynowy, precyzyjny, ceramiczny i szklarski) oraz w przemyśle chemicznym. Coraz większe znaczenie gaz ziemny odgrywa w sektorze energetycznym i ciepłowniczym, ale przede wszystkim w motoryzacji. O atrakcyjności gazu ziemnego, jako paliwa świadczą między innymi takie jego cechy i właściwości użytkowania jak czystość, łatwość transportowania, minimalna ilość substancji szkodliwych wydzielana przy spalaniu, ale przede wszystkim niska cena. Gaz ziemny jest najczystszym paliwem naturalnym. Zarówno procesy związane z jego wydobyciem, jak też transportem i magazynowaniem odbywają się w warunkach bardziej przyjaznych dla środowiska niż w przypadku innych paliw. Gaz ziemny przy dostarczeniu odpowiedniej ilości powietrza spala się całkowicie bez sadzy i popiołu. Produkty spalania gazu ziemnego zawierają niewielkie zawartości substancji zanieczyszczających atmosferę takich jak tlenki azotu, tlenek węgla, dwutlenek węgla, tlenki siarki. Gaz ziemny odznacza się wysoką wartością opałową (ciepło spalania gazu wysokometanowego wynosi  $39 \text{ MJ/m}^3$ , gazu zaazotowanego  $28 \text{ MJ/m}^3$ ) oraz bardzo wysoką sprawnością procesu spalania, co czyni go nie tylko paliwem ekologicznym, ale również atrakcyjnym ze względów ekonomicznych [1].

Obserwowany w ostatnich kilkunastu latach wzrost zainteresowania zasilaniem silników spalinowych węglowodorowymi paliwami gazowymi jest spowodowany dwoma ważnymi cechami tych paliw. Pierwsza to niski koszt uzyskanej z nich energii. Ceny paliw gazowych na rynkach europejskich pozwalają na uzyskanie kosztu jednostki energii na poziomie 30-

50% w przypadku gazu ziemnego i 40-60% w przypadku gazów skroplonych, w stosunku do kosztu jednostki energii zawartej w paliwach ciekłych. Cecha druga to korzystne właściwości ekologiczne paliw gazowych. Badania przeprowadzone po adaptacjach silników do zasilania paliwami gazowymi potwierdziły obniżenie emisji toksycznych składników spalin w stosunku do wartości uzyskiwanych przez silniki zasilane paliwem ciekłym przed adaptacją. Wykorzystanie tych właściwości wymaga jednak spełnienia pewnej grupy warunków. Współczesne silniki, zasilane paliwami gazowymi, są zazwyczaj konstrukcjami pochodnymi od seryjnie produkowanych silników zasilanych paliwami ciekłymi. W czasie prac adaptacyjnych konieczny jest prawidłowy dobór elementów układu zasilania i korekta charakterystyk układu dozującego paliwo, możliwa do przeprowadzenia po fazie badań. Uniwersalne podzespoły układu zasilania paliwem gazowym nie mogą bez korekty spełnić wymagań, pozwalających na uzyskanie korzystnych właściwości ekonomicznych i ekologicznych silnika. Coraz ostrzejsze wymagania norm związanych z emisją toksycznych bądź niepożądanych składników spalin wymagają stosowania specjalnych środków technicznych, również w przypadku silników zasilanych paliwami gazowymi.



Rys. 1. Sieć stacji CNG w Polsce [6]

Oznaczenia:

- czynna całą dobę,
- czynna w ograniczonych godzinach,
- nieczynna z powodu awarii lub innego,
- planowana/w budowie,
- położona zaraz za granicą państwową.

## 1. WŁAŚCIWOŚCI GAZU ZIEMNEGO JAKO ALTERNATYWNEGO PALIWA

Surowcem wyjściowym do produkcji LNG jest gaz ziemny, którego głównym składnikiem jest metan  $\text{CH}_4$  (średnio 85 – 95% objętości). Resztę stanowią węglowodory, takie jak etan  $\text{C}_2\text{H}_6$ , propan  $\text{C}_3\text{H}_8$ , butan  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , gazy obojętne, tj. dwutlenek węgla  $\text{CO}_2$ , azot oraz często woda i siarkowodor. Przed skropleniem gaz ziemny oczyszcza się z dwutlenku węgla, siarkowodoru, wody oraz węglowodorów ciężkich w celu ograniczenia możliwości powstawania korków lodowych z zanieczyszczeń w temperaturach kriogenicznych. Sprawia to, że otrzymany skroplony LNG zawiera głównie metan (nawet do 99%) oraz w przybliżeniu jednakową ilość etanu, propanu i azotu (do 1%).

Skraplanie gazu ziemnego polega na obniżeniu i utrzymywaniu jego temperatury poniżej temperatury wrzenia (dla czystego metanu wynosi ona  $-161,6^\circ\text{C}$  przy ciśnieniu 760 mmHg). Wybór technologii skraplania zależy przede wszystkim od skali zapotrzebowania na LNG, składu węglowodorowego oraz ciśnienia, pod jakim jest dostępny surowy gaz ziemny. Wśród powszechnych metod skraplania występują: klasyczny cykl kaskadowy, cykl kaskadowy z mieszanym czynnikiem chłodniczym oraz cykl rozprężania. Do nowych zalicza się metodę termoakustyczną oraz metodę z wykorzystaniem rury wirowej [3].

Wybrane właściwości fizykochemiczne paliw gazowych i konwencjonalnych zostały przedstawione w tabeli 1. Na podstawie podanych w niej właściwości fizykochemicznych gazu ziemnego można stwierdzić, że jest on dobrym paliwem do silników o zapłonie iskrowym. Wysoka temperatura samozapłonu oraz duża liczba oktanowa i prawie zerowa liczba cetanowa dają bardzo dobre właściwości przeciwstukowe. Sprawia to, że jest możliwe spalanie gazu ziemnego przy wysokich stopniach sprężania (12 – 15:1) [4].

Miarą odporności gazu ziemnego na spalanie stukowe jest liczba metanowa. Im ma ona wyższą wartość, tym większa jest odporność na spalanie stukowe. Liczbę metanową gazu ziemnego wyznacza się w oparciu o porównanie paliwa z dwoma paliwami wzorcowymi: metanem  $\text{CH}_4$  (którego liczba metanowa wynosi 100) oraz wodorem  $\text{H}_2$  (liczba metanowa 0). Ze względu na naturę pomiaru, liczby metanowej nie można w łatwy sposób przeliczyć na liczbę oktanową. W praktyce do ustalania liczby metanowej nie stosuje się testów na silnikach wzorcowych, lecz oblicza się je wg specjalnych algorytmów, znając dokładny skład chemiczny analizowanego paliwa. Oprócz składu węglowodorów na liczbę metanową gazu ziemnego mają też wpływ zanieczyszczenia tego paliwa.

Wysoka temperatura samozapłonu oraz bliska zeru liczba cetanowa uniemożliwiają bezpośrednie użycie gazu ziemnego jako paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. Według badań symulacyjnych, w celu skrócenia okresu opóźnienia samozapłonu gazu ziemnego do wartości ok. 2 ms, dającej możliwość jego praktycznego użycia w silniku o zapłonie samoczynnym, należałoby podczas suwu sprężania wytworzyć temperaturę ładunku rzędu 1200-1300 K. Wymagałoby to stosowania bardzo wysokich stopni sprężania, co nie jest korzystne ze względu na obniżenie sprawności mechanicznej [2].

Gaz ziemny bardzo dobrze miesza się z powietrzem, tworząc jednorodne mieszanki. Silnik zasilany tym paliwem nie wymaga stosowania układu wzbogacania składu mieszanki podczas zimnego rozruchu.

Z uwagi na wysoką energię aktywacji, prędkość laminarnego płomienia mieszanki gazo-powietrznej jest mniejsza od innych paliw. Jest to szczególnie widoczne podczas pracy przy małych i średnich obciążeniach. Wydłuża to okres spalania, pogarszając sprawność obiegu. Ponadto wydłużony okres spalania sprawia, że w momencie otwarcia zaworu wylotowego zarówno ciśnienie, jak i temperatura spalin są wyższe niż przy spalaniu tradycyjnych paliw węglowodorowych. Przeciwdziała się temu, stosując większe wartości kąta wyprzedze-

nia zapłonu, większe wartości stopnia sprężania oraz zwarte komory spalania, dające duże zawirowanie ładunku.

**Tab. 1.** Wybrane właściwości fizykochemiczne paliw konwencjonalnych i gazowych [2]

Lp.	Właściwości	Czysty metan	LNG	CNG	LPG	Olej napędowy	Benzyna
1.	Gęstość paliwa [kg/m <sup>3</sup> ] (w warunkach magazynowania [°C]/[MPa])	0,720 (0/0,1)	425 (-150/0,3)	173 (15°/25)	0,536 (15/1,5)	840-860 (15/0,1)	720-760 (15/0,1)
2.	Wartość opałowa paliwa [MJ/kg] (w warunkach magazynowania [MJ/dm <sup>3</sup> ])	50,0 36,0	49,30 20,95	48,80 8,44	46,05 24,68	42,80 36,38	43,00 31,82
3.	Wartość opałowa mieszanki λ = 1 [kJ/m <sup>3</sup> ]	3370	3310	3310	3660	3745	3660-3960
4.	Stała stechiometryczna [kg/kg]	17,1	17,1	17,1	15,7	14,5	14,9
5.	Liczba oktanowa motorowa MON badawcza RON	100 130	105 110	105 110	110 115	- -	88 98
6.	Liczba cetanowa	~0	~0	~0	~0	43	-
7.	Temperatura wrzenia [K]	111,5	111,5	111,5	231	460-616	299-498
8.	Temperatura samozapłonu (0,1 MPa) [K]	923	813	813	723-783	603-623	753-823
9.	Ciepło parowania [kJ/kg]	510	510	510	426	250	230-335
10.	Granice zapalności [% oboj.]	5,0-15,0	5,0-15,0	5,0-15,0	2,1-9,4	1,0-6,0	1,2-7,4

W wyniku małej gęstości gazu ziemnego, w stechiometrycznej mieszance gazowo-powietrznej (λ = 1) ok. 10% objętości zajmuje samo paliwo. Powoduje to, że całkowita ilość mieszanki, jaka może być spalona w pojedynczym cyklu pracy silnika, jest mniejsza o ok. 10%, dając w efekcie spadek mocy silnika. Problem ten dotyczy silników zasilanych za pomocą mieszalnika lub układu wtrysku pośredniego do kolektora dolotowego.

Granice zapalności gazu ziemnego są znacznie szersze niż paliw tradycyjnych. Daje to możliwość łatwiejszego spalania mieszanek ubogich. Ponadto zastosowanie systemu spalania ładunku uwarstwionego pozwala na jeszcze większe rozszerzenie zakresu zapalności mieszanki gazowo-powietrznej.

Z uwagi na silną zależność składu gazu ziemnego od źródła jego pochodzenia wprowadzono wskaźnik oceny jego właściwości. Jest to liczba Wobbego [5], która zdefiniowana jest jako stosunek wartości ciepła spalania do gęstości gazu względem powietrza.

$$W = \frac{H_g}{\sqrt{\Delta}} \quad (1)$$

gdzie:

$H_g$  – wartość cieplna spalania,  $\frac{kg}{m^3}$ ,

$\Delta = \frac{\rho_{gaz}}{\rho_{powietrze}}$  – gęstość gazu względem gęstości powietrza,

$\rho_{gaz}$  – gęstość gazu,

$\rho_{powietrze}$  – gęstość powietrza.

Ze wzrostem w gazie ziemnym zawartości azotu, dwutlenku węgla, wody i siarkowodoru wartość liczby Wobbego zmniejsza się [5].

## PODSUMOWANIE

Gaz ziemny może stać się najbardziej ekologicznym i rozpowszechnionym paliwem silnikowym z rodziny paliw węglowodorowych. Stanie się tak pod warunkiem, że będzie on

w odpowiedni sposób wykorzystywany. Pełnię zalet ekologicznych można wykorzystać tylko w odpowiednio przygotowanych silnikach, skonstruowanych specjalnie z myślą o używaniu tego paliwa, ponieważ istnieje duże prawdopodobieństwo, że adaptowanie współczesnych silników benzynowych do zasilania gazem ziemnym, realizowane poprzez stosowanie dostępnej na rynku uniwersalnej aparatury gazowej będzie charakteryzowało się wzrostem emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach, co jest zjawiskiem odwrotnym do pożądanego. Z samego składu chemicznego paliwa, jakim jest gaz ziemny, wynika, że z uwagi na zwiększony udział wodoru względem węgla w produktach spalania tego paliwa odpowiednio więcej będzie produktów utleniania wodoru (H<sub>2</sub>O), a mniej produktów spalania węgla pod postacią tlenku i dwutlenku. Cenną własnością jest redukcja o około 23% emisji CO<sub>2</sub>, co w perspektywie przyszłościowego ograniczenia emisji tego składnika dla zmniejszenia efektu cieplarnianego na Ziemi, czyni z gazu ziemnego paliwo przyszłościowe.

Kurczą się zasoby tradycyjnych paliw kopalnych oraz niezbyt bliska perspektywa wprowadzenia wodoru jako paliwa do seryjnych autobusów, otwierają szerokie możliwości przed rynkiem pojazdów zasilanych gazem ziemnym. Świadczy o tym fakt, że prace badawcze nad silnikami z zasilaniem gazowym nabierają tempa. Pozwala to sądzić, że w najbliższym czasie rynek silników gazowych przestanie być wąską niszą, a silniki te na tyle rozwiną się technicznie, że będą rzeczywistą konkurencją dla silników o ZS. Przy stale rosnących cenach oleju napędowego i benzyny powinno się to przyczynić do wzrostu zainteresowania silnikami gazowymi, także ze względu na ich bardzo dobre właściwości ekologiczne.

Zastosowanie gazu ziemnego do zasilania silników spalinowych posiada, jak już wspomniano, wiele zalet:

- niską zawartość siarki, w konsekwencji niską emisję związków siarki,
- bardzo niską emisję cząstek stałych (PM),
- bardzo niską emisję par paliwa (emisję z całego pojazdu),
- zmniejszoną emisję dwutlenku węgla,
- zmniejszoną emisję po zimnym rozruchu silnika,
- wysoką liczbę oktanową (możliwość stosowania wyższych stopni sprężania),
- rozszerzone granice zapalności (możliwość pracy na mieszankach ubogich),
- niższą temperaturę spalania adiabatycznego prowadzącą do obniżenia emisji NO<sub>x</sub>,
- wyższą temperaturę zapłonu, mniejsze niebezpieczeństwo samozapłonu,
- składniki paliwa nie są bezpośrednio toksyczne,
- mniejszą emisję aldehydów (30-80%), prawie całkowitą eliminację benzenu i 1-3 butadienu,
- zmniejszony poziom hałasu pracy silnika,
- - bardzo niski wpływ na tworzenie się smogu.

Niestety wykorzystanie gazu ziemnego wiąże się także z pewnymi ograniczeniami. Jako wady zasilania gazem ziemnym uważa się:

- utrudnione magazynowanie z uwagi na niską gęstość energii,
- wymagane sprężanie gazu (nakład energii 0,16 kWh/m<sup>3</sup> powoduje o 4% zwiększenie emisji CO<sub>2</sub>),
- ograniczony zasięg poruszania się pojazdu (tylko dla układu jednopaliwowego),
- utrudnione dopalanie katalityczne metanu (wymagane specjalne reaktory katalityczne),
- znaczną masę zbiorników gazu, powodującą wzrost zużycia paliwa,
- negatywny wpływ emisji metanu, który tak jak CO<sub>2</sub> jest gazem cieplarnianym,
- konieczność osuszania gazu dla przeciwdziałania zamarzaniu instalacji,
- wydłużony czas tankowania pojazdu,
- spadek mocy silnika (o około 10%),
- możliwość występowania zjawiska cofania się płomienia (ewentualne uszkodzenia kolektora dolotowego).

Biorąc pod uwagę wszystkie „za i przeciw” można z całą odpowiedzialnością stwierdzić, że gaz ziemny jest paliwem przyszłości i w ocenie jego przydatności do zasilania tłokowych silników spalinowych należy mu przyznać bardzo wysokie noty, które niewątpliwie przyczynią się do jego coraz szerszego wykorzystania zarówno w motoryzacji jak i w innych działach przemysłu.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Brzeżański M., Golec K., *Nowoczesne systemy zasilania silników spalinowych paliwami gazowymi*. Silniki Gazowe 2003, WPC, Częstochowa 2003.
2. Dudek S., *Możliwości zastosowania skroplonego gazu ziemnego jako paliwa silnikowego*. Silniki Gazowe 2003, WPC, Częstochowa 2003.
3. Molenda J., *Gaz ziemny – paliwo i surowiec*. WNT, Warszawa, 1993
4. Piwowarski A. J., *Koncepcja termo-akustyczna, skraplanie gazu ziemnego*. Nafta & Gaz Biznes, Maj, 2002.
5. Sas J., *Aktualny stan CNG na świecie, a perspektywy stosowania takiego paliwa w Polsce*. Silniki Gazowe, WPC, Częstochowa, 2003.
6. <http://mapy.google.pl/maps/ms?msid=206576777035412570860.000448ca6581a2b36dd2d&msa=0>.

# **PROPERTIES OF NATURAL GAS AS A FUEL TO SUPPLY INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

### ***Abstract***

*The paper presents some properties and characteristics of natural gas and to its use as a fuel to power vehicles.*

**Key words:** natural gas, properties, vehicles

### ***Autor:***

dr inż. **Mirosław Uzdowski** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie