

# GAZ ZIEMNY PALIWEM OPTYMALNYM DO NAPĘDU POJAZDÓW

**Przedruk z artykułu**

**Warowny W., Tkacz A.**

„Gaz ziemny paliwem optymalnym do napędu pojazdów

cz. I. Zagadnienia przyrodnicze i techniczne”,

*Nowoczesne Gazownictwo*, 4(VII), 41-46 (2002)

## **Cz.I Zagadnienia przyrodnicze i techniczne**

Problematykę związaną z gazem ziemnym jako paliwem do silników spalinowych pod wspólnym tytułem „Gaz ziemny paliwem optymalnym do napędu pojazdów” podzielono na dwie części: 1) Zagadnienia przyrodnicze i techniczne oraz 2) Przesłanki i rozwój rynku. W niniejszej części scharakteryzowano gaz ziemny pod kątem paliwa silnikowego, jego atrybuty ekologiczne i szereg innych pozytywów jako paliwa zastępczego oraz zagadnienia bezpieczeństwa, techniczne i technologiczne związane z jego użytkowaniem. W części drugiej, przeznaczonej do opublikowania w następnym numerze czasopisma, powiązanej ściśle z niniejszym tekstem przedstawiono stan obecny i trendy rozwoju rynku, wybrane normy i przepisy, bariery do pokonania oraz przesłanki ekonomiczne i strategię rozwoju rynku motoryzacyjnego w oparciu o gaz ziemny.

Wiek XX był okresem dominacji benzyny i oleju napędowego wytwarzanych z ropy naftowej, natomiast w pierwszej połowie obecnego wieku w bilansie paliw do napędu pojazdów wzrosła rola gazu ziemnego będącego pomostem do paliwa wodorowego. W rozwoju strukturalnym paliw motoryzacyjnych obserwuje się zmiany dążące do zmniejszenia w paliwie ilości węgla pierwiastkowego w stosunku do wodoru aż do jego całkowitego wyeliminowania, w następującym szeregu: olej napędowy → benzyna → mieszanina propan-butany → alkohole → gaz ziemny → wódz. Obecny wiek zaznaczy się intensyfikacją rozwoju nowych technik i technologii związanych z gazem ziemnym. Wiele technologii jest już w stanie zaawansowanych badań. W ostatnich dwudziestu latach zainteresowanie gazem ziemnym szybko wzrasta na rynku paliw silnikowych, szczególnie w krajach o łatwym do niego dostępie. Gaz ziemny wśród obecnie stosowanych paliw silnikowych ma cechy paliwa doskonałego: ekologicznego, wbrew pozorom bezpiecznego i wygodnego w użytkowaniu. Powodów zainteresowania się gazem ziemnym jest wiele więcej: dywersyfikacja paliw silnikowych, większe jego naturalne zasoby od ropy naftowej, jako paliwo chemicznie gotowe i ogólnodostępne (w tym ze źrózł lokalnych),

łatwe do transportu, nie wymagające magazynowania u odbiorcy, możliwe do bezpośredniego napełniania w domu z własnego przyłącza oraz o znacznych korzyściach eksploatacyjnych pojazdów. W pierwszej kolejności rynek gazu ziemnego do napędu silników będzie rozwijał się w aglomeracjach miejskich dla pojazdów ciężkich (autobusy i samochody służb komunalnych) oraz taksówek, co jest już faktem w wielu miastach świata. Na świecie w niektórych miastach obecnie jeździ 20-30% autobusów napędzanych gazem ziemnym. Innym przykładem może być metropolia Buenos Aires, gdzie w krótkim czasie prawie wszystkie taksówki zamieniono na pojazdy napędzane gazem ziemnym. Polska mająca duże tradycje w wykorzystaniu gazu ziemnego jako paliwa silnikowego jest jednak dopiero na etapie badań strukturalnych po czasie regresji ostatnich dwudziestu lat.

### **Gaz ziemny - zastępcze paliwo silnikowe**

Obecnie w silnikach spalinowych dominującą rolę odgrywa benzyna i olej napędowy będące produktami ropy naftowej oraz w małym stopniu paliwo funkcjonujące pod zwyczajową nazwą autogaz (gaz płynny, LPG), będące mieszaniną propanu, propenu i butanów z produktów rafineryjnych ropy naftowej lub wytwarzane z lżejszej frakcji gazoliny przy stabilizacji gazu ziemnego. Znana jest również cała gama innych mniej popularnych paliw silnikowych zwanych zastępczymi: wodór, gaz ziemny, alkohole (metanol, etanol), biopaliwa oraz elektryczne napędy pojazdów. W Unii Europejskiej problem paliw zastępczych dla transportu doczekał się etapu Dyrektyw, w których zakłada się możliwość zamiany 20% zużycia oleju napędowego i benzyny na paliwa zastępcze w krajach członkowskich do roku 2020. Zwraca się uwagę na trzy najważniejsze rodzaje paliw, które zastąpią w okresie 20 lat ponad 5% całkowitego zużycia energii w sektorze transportu: biopaliwa do wykorzystania od zaraz, gaz ziemny w okresie średnio terminowym oraz w okresie długoterminowym wodór i ogniwa paliwowe [1]. Należy również brać pod uwagę metanol, jako nowe paliwo silnikowe i półprodukt do ogniw paliwowych, którego postać ciekła w warunkach otoczenia - ułatwia jego magazynowanie.

Obszerną charakterystykę gazu ziemnego jako paliwa do pojazdów kołowych przedstawiono w pracy [2], w której podano zasoby, potrzeby i wykorzystanie gazu ziemnego, charakterystykę składu gazów ziemnych, jego zachowanie się i właściwości fizykochemiczne oraz ich porównanie z paliwami opartymi na ropie naftowej. Poza tym omówiono wszystkie aspekty technologiczne i użytkowe sprężonego gazu ziemnego jako paliwa silnikowego, dlatego w niniejszym artykule tego typu informacje zawężono do koniecznego minimum. Najważniejszymi właściwościami charakteryzującymi gaz ziemny są: skład, gęstość, ciepło spalania i warunki wykraplania się z niego wody i węglowodorów (tak zwane punkty rosy) dla określonego ciśnienia i temperatury. Gaz ziemny nie zawiera w ilościach znaczących substancji szkodliwych dla zdrowia, brak jest w jego składzie gazów korozyjnych i jest dużo lżejszy od

powietrza (stosunek gęstości gazu do gęstości powietrza w zależności od składu wynosi od 0,55 do 0,58). Bezwonność gazu ziemnego wymaga nawaniania w celu wykrywania nieszczelności w układzie. W Polsce skład gazu ziemnego do celów motoryzacyjnych powinien zawierać się w zakresie  $0,95 \pm 0,03$  ułamka molowego (objętościowego) metanu, co pozwala na równomierne i bezstukowe spalanie w związku z jego dużą liczbą metanową, będącą odpowiednikiem liczby oktanowej zawartej pomiędzy 125-135.

Warunkiem koniecznym stosowania gazu ziemnego jako paliwa do pojazdów kołowych jest magazynowanie jego dużej ilości w małej objętości, celem otrzymania wymaganej wartości „gęstości energetycznej” gazu. Techniczna realizacja tego warunku wymaga jego sprężenia, skroplenia lub wykorzystania innego zjawiska na zagęszczenie gazu w zbiorniku pojazdu lub stacji paliw, na przykład adsorpcji. Sprężanie gazu ziemnego wykonuje się do optymalnego ciśnienia w zakresie 17-25 MPa. Dolna granica ciśnienia wynosząca około 17 MPa uzasadniona jest minimalną wartością współczynnika ściśliwości metanu w temperaturach otoczenia, natomiast górna granica ciśnienia uwarunkowana względami bezpieczeństwa i w zasadzie jej wartość jest problemem otwartym. Energia zużyta na sprężenie gazu ziemnego do 20 MPa wynosi około 4% energii w nim zawartej. Krotność wzrostu masy sprężonego gazu ziemnego w tej samej temperaturze i objętości magazynowania równa się ilorazowi gęstości gazu pod ciśnieniem magazynowania do gęstości gazu dla ciśnienia roboczego silnika, zwykle atmosferycznego. Metoda skraplania gazu ziemnego jest metodą około trzykrotnie bardziej wydajną od metody sprężania gazu w przeliczeniu na ilość energii magazynowanej w jednostce objętości, ale jest bardziej energochłonna. Gęstość gazu ziemnego w stanie skroplonym wynosi 0,53-0,64% wartości gęstości benzyny i oleju napędowego. Warunkiem koniecznym przed skropleniem gazu ziemnego jest dokładne jego oczyszczenie z wilgoci, dwutlenku węgla i z wyższych węglowodorów. Skroplony gaz ziemny (LNG) jest praktycznie czystym metanem (99%) ze śladowymi domieszkami etanu, azotu i czasami helu, który magazynuje się pod ciśnieniem atmosferycznym w temperaturze około minus 163°C. Stosunek zmniejszenia objętości gazu ziemnego z warunków normalnych stanu gazowego do jego stanu skroplonego wynosi około 630. Na obecnym etapie rozwoju technologii motoryzacyjnych jedynym szeroko stosowanym rozwiązaniem komercyjnym jest postać sprężonego gazu ziemnego (CNG), która to technologia jest ciągle doskonała, czego przykładem są kompozytowe i adsorpcyjne zbiorniki do napełniania gazem. Sprężony gaz ziemny do napędu pojazdów musi również spełniać wysokie wymagania w odniesieniu do jego wilgotności i zawartości cząsteczek stałych. Zawartość pary wodnej w gazie ziemnym przesyłanym gazociągami wysokociśnieniowym zazwyczaj wynosi powyżej 100 mg wody w przeliczeniu na m<sup>3</sup> gazu. Dla paliwa do pojazdów wartość taka byłaby zbyt duża. Metody i warunki osuszania przedstawiono w pracy [2]. Warto zwrócić uwagę na coraz to nowe metody magazynowania gazu ziemnego w postaci skroplonej, sprężonej i zaadsorbowanej takie jak skraplanie termoakustyczne czy sprężanie w grubościennych rurkach o małej średnicy („coselle”) [3].

## Ekologia i bezpieczeństwo

Gaz ziemny charakteryzuje się najniższą emisją zanieczyszczeń przed i po jego spalaniu i wbrew pozorom jest najbezpieczniejszym paliwem silnikowym, które to atrybuty razem ze zjawiskami towarzyszącymi paliwom silnikowym omówiono obszernie w pracach [2] i [4]. Dobre spalanie paliwa zależy od jego rodzaju i jakości oraz od stosownych katalizatorów. Podczas spalania paliw ciekłych z ropy naftowej tworzą się: dwutlenek węgla, tlenki siarki i azotu ( $\text{NO}_x$ ), zanieczyszczenia związane z niekompletnym spalaniem (tlenek węgla, sadza, aldehydy) oraz pozostałości szkodliwych składników z niespalonego paliwa, takie jak - uważane za rakotwórcze: butadien i węglowodory aromatyczne (benzen, toluen, ksylen i związki wielopierścieniowe). W spalinach znajdują się także pyły, cząsteczki metali ciężkich oraz substancje wpływające na efekt cieplarniany, do których należą między innymi: dwutlenek węgla, ozon, tlenki azotu i metan. Za efekt cieplarniany powodujący zmianę klimatu w 50% odpowiedzialne są produkty spalania, w tym z silników motoryzacyjnych. Często spotykanym zjawiskiem jest smog będący zawieszoną mgłą, węglowodorów i cząsteczek substancji powstałych podczas spalania paliwa (tlenki azotu i siarki) lub tworzących się pod wpływem energii słonecznej substancji wtórnych (nadtlenuki, ozon, azotany czy aldehydy). Aldehydy i związki nitrowe powstają najczęściej z węglowodorów w reakcjach fotochemicznych w atmosferze. W aglomeracjach miejskich uliczny ruch samochodowy oprócz zanieczyszczeń atmosfery i gleby substancjami toksycznymi i szkodliwymi dla zdrowia jest często również czynnikiem decydującym o znacznym przekroczeniu hałasu. Taki stan rzeczy powoduje poszukiwania czystszych paliw silnikowych, o zawartości odpadów akceptowalnych przez środowisko przyrodnicze, szczególnie dla obszarów miejskich, terenów zabudowanych i rekreacyjnych wymagających bezwzględnej ochrony środowiska. Pojazdy miejskie napędzane gazem ziemnym nie emitują substancji szkodliwych: aldehydów, wyższych węglowodorów nasyconych i aromatycznych oraz nadmiernie nie występują trujące tlenki nieorganiczne (tlenek węgla, tlenki siarki i azotu) odpowiedzialne za kwaśne deszcze i cząstki stałe (pył, sadza). Związki siarki występujące czasami w gazie ziemnym eliminowane są w procesie uzdatniania przed jego magazynowaniem w postaci sprężonej lub skroplonej. Natomiast w spalinach występują niewielkie ilości metanu związane z brakiem absolutnej szczelności układu. Odpowiednio przygotowany gaz ziemny jest paliwem spełniającym wszystkie poziomy zanieczyszczeń zapisane w kolejnych rygorystycznych normach Euro. Norma Euro III obowiązuje od roku 2000, natomiast w przyszłości będą obowiązywać normy Euro IV (rok 2005) i Euro V (rok 2008). W tabelicy 1 porównano emitowane ilości wybranych składników spalin dla autobusów napędzanych gazem ziemnym i olejem napędowym z wymogami norm Euro. Autobusy napędzane gazem ziemnym nie powodują zadymienia i nieprzyjemnego zapachu w miejscach postojów i wzdłuż tras przejazdów oraz zwiększają komfort pasażerów i kierowców poprzez dwukrotne zmniejszenie hałasu i wibracji.

Tablica 1. Zakresy emisji norm Euro i ich porównanie ze spalinami dla autobusów

Składniki	Normy Euro			Silniki autobusowe	
	<i>Euro III</i>	EuroIV	EuroV	<i>Silnik MANE2866</i> na gaz ziemny	<i>Wysokoprężny silnik MANC826</i>
	<i>Wskaźnik emisji substancji szkodliwychw spalinach; g/kWh</i>				
Tlenki azotu (NO <sub>x</sub> )	5,0	3,5	2	0,94	8,01
Tlenek węgla (CO)	2,1	1,5	1,5	1,12	1,01
Węglowodory wyższe (HC)	0,66	0,46	0,46	0,16	0,33
Cząstki stałe (PM)	0,1	0,02	0,02	<0.05	0,25

Gaz ziemny jako paliwo silnikowe bezwonne, bez smaku, niewidoczne oraz mało bezpieczne stwarza nieuzasadniony lęk użytkownika. Stereotyp ten został wykreowany przez inne uwarunkowania. Nieznajomość przez użytkownika podstawowych właściwości gazu ziemnego oraz brak możliwości bezpośredniego sprawdzenia jego zachowania się w sposób wizualny czy organoleptyczny powoduje nieuzasadniony negatywny odbiór społeczny. Groźne w skutkach wybuchy gazu, przekazywane opinii publicznej, związane są najczęściej z brakiem ostrożności i nie zawsze dotyczą gazu ziemnego, ale zazwyczaj są jemu przypisywane. W przypadku nieszczelności układu gazowego w pojeździe gaz ziemny jako dużo lżejszy od powietrza, ulatnia się natychmiast do atmosfery, w odróżnieniu od gromadzącej się nad powierzchnią cięższej od powietrza mieszaniny propanu-butanów lub rozlewających się po powierzchni paliw ciekłych. Należy zauważyć, że w dotychczasowej eksploatacji 1,5 mln pojazdów na sprężony gaz ziemny nie stwierdzono zagrożeń związanych z ewentualnymi śladowymi przeciekami gazu. Temperatura samozapłonu gazu ziemnego jest wyższa od temperatur zapłonu benzyny, oleju napędowego i mieszaniny propanu-butanów utrudniając tym samym jego przypadkowy zapłon, a poza tym stężenia gazu ziemnego w granicach stężeń wybuchowości z powietrzem (5%-15%) występuje zbyt krótko, aby mogło dojść do zagrożenia eksplozją w otwartej przestrzeni atmosferycznej, natomiast rozszerzone granice zapłonu pozwalają stosować mieszanki ubogie. Ważną zaletą wynikającą z właściwości paliwa gazowego jest możliwość regulacji procesów i urządzeń, takich jak automatyczne odcięcie dopływu gazu ziemnego do silnika w sytuacjach niebezpiecznych oraz zamknięty system napełniania od gazociągu po silnik. Wytrzymałość zbiorników gazowych jest znacznie wyższa od zbiorników

niskociśnieniowych na paliwa ciekłe, ponieważ sprężony gaz ziemny magazynuje się w zbiornikach ciśnieniowych sprawdzonych na wytrzymałość materiału oraz na uderzenia w czasie wypadku, pożaru i eksplozji.

### **Inne przesłanki stosowania paliw zastępczych**

Poza ekologią i bezpieczeństwem występuje szereg innych pozytywów natury ogólnej lub bezpośrednio odniesionych do eksploatacji pojazdu napędzanego gazem ziemnym. Udokumentowane naturalne zasoby gazu ziemnego przeliczone na obecne jego zapotrzebowanie wystarczą na około siedemdziesiąt lat, podczas gdy złoża ropy naftowej tylko na pół wieku. Gaz ziemny do napędu silników samochodowych jest tym samym gazem dostarczany siecią gazociągów podziemnych, który używa się jako surowiec chemiczny i do celów energetycznych (odbiorcy przemysłowi gazu, komunalni, domowi i elektroenergetyka). Poza tym istnieje możliwość bezpośredniego zagospodarowania gazu ziemnego jako paliwa do silników, w przypadku nie rentowności jego przesyłu ze złóż lokalnych, marginalnych, trudnodostępnych i gazu marnotrawionego podczas bezużytecznego spalania w pochodniach procesów technologicznych. Gaz ziemny przed jego wykorzystaniem jako paliwo silnikowe wymaga jedynie uzdatnienia i dodatkowego sprężania. Jak każdy gaz jest on ściśliwy, pozwala to na jego magazynowanie pod ciśnieniem w podziemnych zbiornikach naturalnych, takich jak skały porowate, kaweony solne, warstwy wodonośne, wyrobiska węglowe, gazociągi przesyłowe i dystrybucyjne oraz na powierzchni w postaci skroplonej i w zbiornikach ciśnieniowych. Ostatnio bada się możliwości magazynowania gazu ziemnego pod postacią hydratów [5]. Dywersyfikacja magazynowania gazu ziemnego, zazwyczaj dużych ilości, gwarantuje niezawodność jego dostaw do odbiorcy w każdych warunkach. Poza tym niezależność i łatwość transportu gazu ziemnego do punktu przeznaczenia powoduje brak konieczności jego magazynowania u odbiorcy. Gaz ziemny można transportować niezależnie od aury i niebezpieczeństw wynikających z transportu drogowego. Gaz ziemny może być paliwem zastępczym, a właściwie strategicznym, w przypadku zakłócenia dostaw ropy naftowej lub wzrostu jej cen z powodu zmniejszających się jej zasobów oraz dlatego, że rozmieszczenie geograficzne złóż gazu ziemnego nie pokrywa się jednoznacznie ze złożami ropy naftowej. W Polsce zapotrzebowanie na gaz ziemny gwarantowane jest umowami długoterminowymi, co stwarza możliwość rozwoju rynku motoryzacyjnego opartego o paliwa zastępcze, jakimi są sprężony gaz ziemny i wodór. Na świecie cena nabywca gazu ziemnego odniesiona do innych paliw (benzyny, oleju napędowego, gazu płynnego i alkoholi) jest znacznie niższa. Koszty ekologiczne budowy silnika diesla i oczyszczania paliwa ciekłego są znacznie wyższe dla osiągnięcia tego samego poziomu czystości spalin silnika gazowego.

Rozwój rynku sprężonego gazu ziemnego dla pojazdów będzie wymagał nowej infrastruktury, w tym budowy innego typu stacji tankowania, nowych lub przystosowanych na gaz ziemny pojazdów, urządzeń pomocniczych i usług serwisowych, co spowoduje powstanie nowych miejsc pracy. Gaz ziemny jest wygodny w użytkowaniu, pozwalając na automatyzację procesów. Ponadto w niskiej temperaturze pozwala na łatwiejszy rozruch silnika o zapłonie iskrowym. Stosowanie gazu ziemnego powoduje mniejsze zużycie oleju silnikowego oraz dłuższą żywotność silnika i filtrów oleju. Gaz ziemny słabo rozpuszcza się w związkach organicznych o dużej masie cząsteczkowej, czego konsekwencją jest lepsze smarowanie gładzi cylindrów oraz brak osadzania się cząstek stałych na ściankach **Błąd! Nieprawidłowe łącze**. Spalanie gazu jest czyste bez powstawania nagaru na elementach silnika powodując przedłużenie trwałości świec.

Wykorzystanie gazu ziemnego stwarza nowe możliwości rozwiązań technicznych i unowocześnienia taboru samochodowego. Technologia motoryzacyjna oparta o gaz ziemny (sprężony i skroplony) jest pierwowzorem dla najbardziej ekologicznego z ekologicznych paliwa wodorowego przeznaczonego dla silników spalinowych lub ogniw paliwowych. W przeciwieństwie do paliw naturalnych dostępność wodoru w przyrodzie jest mała, dlatego wodór należy wyprodukować z innych paliw (biomasy, paliw kopalnianych; węgla, ropy naftowej, gazu ziemnego) metodami zgazowania, katalitycznej konwersji czy reformingu, lub otrzymany z wody metodą elektrolityczną wykorzystując odnawialne źródła energii (słonecznej, wiatrowej, geotermalnej czy z elektrowni wodnych). Wodór należy do paliw o zerowej bezpośredniej emisji zanieczyszczeń, ponieważ zarówno jego spalanie jak i reakcja chemiczna w ogniwach paliwowych jest syntezą wody. Jako konsekwencja spalania wodoru powietrzem, a nie tlenem, mogą występować śladowe ilości tlenków azotu. Wodór jako paliwo w pojazdach może być magazynowany w postaci sprężonej (300 bar), ciekłej (-253 °C) lub wodorków metali. Wiodącą rolę w rozwoju silników spalinowych na wodór odgrywa BMW produkując samochody o mocy silnika 280 kW i zasięgu 350 km, natomiast pojazdy na ogniwa paliwowe są specjalnością konsorcjum Daimler-Chrysler. W porównaniu z silnikiem spalinowym na wodór ogniwa paliwowe zwiększają wielokrotnie zasięg przejazdu pojazdu i podwajają sprawność silnika. Dotychczas koncentrowano się na wysokotemperaturowych ogniwach paliwowych (fosforowych, węglanowych i tlenkowych) do celów elektroenergetycznych, natomiast obecnie testuje się z powodzeniem niskotemperaturowe ogniwo membranowe (PEM - Proton Exchange Membrane) zarówno do celów motoryzacyjnych jak i elektroenergetycznych. Jednak napęd pojazdów na ogniwa paliwowe PEM znajduje ciągle ograniczone zastosowanie ze względu na wysokie koszty, duży ciężar ogniwa, zajmowaną przez niego przestrzeń i proces

produkcji wodoru. Bezpośredni rozkład metanu (gazu ziemnego) tak jak metanolu na anodzie ogniwa paliwowego byłby w motoryzacji rozwiązaniem przełomowym w jego wykorzystaniu.

Tablica 2. Dane robocze dla samochodu osobowego Volvo S80 - samochód dwupaliwowy (gaz ziemny, olej napędowy) o silniku pięciocylindrowym, pojemność 2435 cm<sup>3</sup>, moc wyjściowa 103 kW (140 bhp) przy szybkości obrotów 5400 rpm (ręczny) 4500 rpm (auto) oraz maksymalna prędkość 205 km/godz. (ręczny) i 200 km/godz. (auto).

Paliwo silnikowe	Przyspieszenie od 0 do 100 km/godz.		Zakres jazdy z pełnym zbiornikiem		Zużycie paliwa w litrach na 100 km		Emisja dwutlenku węgla	
	ręczny	auto	ręczny	auto	ręczny	auto	ręczny	auto
Gaz ziemny	11,0 sek.	11,9 sek.	311 km	288 km	7,4m <sup>3</sup>	8,0m <sup>3</sup>	165 g/km	175 g/km
Olej napędowy	10,5 sek.	11,4 sek.	349 km	319 km	8,6dm <sup>3</sup>	9,4 dm <sup>3</sup>	205 g/km	222 g/km
Objaśnienia: ręczny- ręczna skrzynia biegów, auto- automatyczna skrzynia biegów								

Po stronie negatywów i barier stosowania sprężonego gazu ziemnego jako paliwa silnikowego są: brak polityki informacyjnej dla społeczeństwa, zmieniającej niekorzystny wizerunek gazu ziemnego jako paliwa bezpiecznego, nieznaczne zmniejszenie mocy silnika i szybkości poruszania się pojazdu (tab. 2), większy ciężar dotychczas stosowanych butli stalowych wpływający na ładowność pojazdu, wyższa temperatura spalin silnika gazowego niż silnika o zapłonie samoczynnym, zmienny, ale określony normami skład gazu, brak zatwierdzonych przepisów i norm utrudniających między innymi homologację, dodatkowe koszty na sprzężenia paliwa i budowę całej infrastruktury, większe koszty zakupu lub przeróbki pojazdu, ograniczony zasięg jazdy bez konieczności tankowania (brak sieci stacji tankowania, mniejsza „gęstość energetyczna” gazu związana z mniej efektywnym magazynowaniem sprężonego gazu ziemnego w jednostce objętości w odniesieniu do paliw ciekłych). Dla orientacji zakładając, że 1 litr oleju napędowego odpowiada energetycznie 1 m<sup>3</sup> gazu ziemnego, wtedy w 50 litrowym zbiorniku można zmagazynować 13 m<sup>3</sup> gazu ziemnego sprężonego do 20 MPa, co odpowiada zmagazynowaniu w tej objętości tylko 26% objętości paliw ciekłych. Tak, więc objętość zbiorników na gaz ziemny musi być około czterokrotnie większa od tradycyjnego baku. Ostatnio w pojazdach stosuje się z powodzeniem lekkie zbiorniki wytrzymałe na bardzo wysokie ciśnienia zbudowane z materiałów kompozytowych, co polepsza także parametry silnika związane z ładownością. Również ujednoczenie i zatwierdzenie przepisów i normaty w przystosowanych do wykorzystania w pojazdach sprężonego gazu ziemnego napotyka w Polsce na szereg trudności, które są jednak sukcesywnie rozwiązywane, aczkolwiek zbyt powolnie. Obniżenia kosztów można



spodziewać się w miarę poprawy jakości materiałów, masowości produkcji pojazdów napędzanych gazem ziemnym, zwiększenia ilości punktów tankowania pojazdów sprężonym lub skroplonym gazem ziemnym i wprowadzenie nowych rozwiązań technicznych, takich jak magazynowanie gazu w zbiornikach adsorpcyjnych czy membranowe osuszanie gazu ziemnego. Zaliczenie gazu ziemnego do paliw ekologicznych i stosowanie nowych technologii pozwala na staranie się o dotacje i kredyty preferencyjne z funduszy ochrony środowiska i funduszy UE. Z powyższych faktów wynika, że przedstawione wady są możliwe do zminimalizowania a nawet niektóre z nich nawet do wyeliminowania.

## **Technika**

Najważniejszymi elementami w tworzeniu rynku sprężonego gazu ziemnego do napędu pojazdów są: miejsce i lokalizacja poboru gazu, typ stacji tankowania i jej infrastruktura, zbiorniki ciśnieniowe i rodzaj pojazdów. Istniejąca sieć gazowa pozwala na łatwy i stały dostęp do gazu ziemnego oraz daje możliwość zbudowania stanowiska tankowania gazem ziemnym w dowolnym miejscu sieci średniego ciśnienia (do 0,5 MPa), podwyższonego ciśnienia (do 1,6 MPa) i z sieci wysokoprężnej do 6,3 MPa. Zużycie energii na sprężanie gazu w stacjach tankowania promuje stacje podłączone do przesyłowej sieci wysokociśnieniowej (stacje z sprężarkami jedno i dwustopniowymi) lub stacje blisko kopalń wykorzystujące bezpośrednio ciśnienie złożowe. Na świecie istnieje tendencja do budowania modułowych stacji sprężonego gazu ziemnego, które pozwalają na zwiększenie możliwości technicznych poprzez stopniową wymianę sprężarek na jednostki o większym wydatku lub zwiększenie ilości i wydajności stosowanych sprężarek. Istnieją firmy, które oferują elementy stacji do zabudowy modułowej lub gotowe stacje tankowania, w tym kontenerowe stacje sprężarek. W Ameryce Północnej bardzo popularne stają się małe sprężarki domowe oferowane odbiorcom indywidualnym dla wielogodzinnego napełniania zbiornika oraz sprężarki przewoźne, stosowane w punktach poboru sprężonego gazu ziemnego rozmieszczonych w gęstej sieci rurociągów przesyłowych odległych od siebie w promieniu nie większym niż kilkanaście kilometrów. W niestacjonarnych punktach tankowania i poboru gazu znajduje się zestaw wysokociśnieniowych butli gazowych uzupełnianych okresowo sprężonym gazem.

Stacje tankowania można podzielić na następujące elementy składowe:

- aparaturę do pomiaru rozliczeniowego z dostawcą gazu,
- instalację do osuszania i oczyszczania gazu z pyłów (filtr gazu dla cząstek stałych, kondensatów i zawiesin),
- zestaw sprężarek i butli do magazynowania,
- urządzenia do sterowania i automatyki,
- stanowisko do szybkiego i wolnego tankowania,

- manometry i liczniki ilości pobranego gazu.

Jednym z wymagań uruchomienia stacji tankowania jest minimalny stały pobór gazu w jednostce czasu. Podstawowym kryterium dwóch systemów tankowania (wolnego i szybkiego) jest czas napełniania gazem ziemnym zbiornika w pojeździe. Oba systemy tankowania różnią się od siebie kosztami inwestycyjnymi oraz rozwiązaniami techniczno-technologicznymi. Stacje paliw wolnego tankowania są łatwiejsze w budowie. Na stacjach stacjonarnych wolnego tankowania napełnianie sprężonym gazem ziemnym polega na bezpośrednim kilkugodzinnym napełnianiu zbiornika pojazdu za pomocą sprężarek wielostopniowych. W wariacie tym nie występuje konieczność sprężania gazu do zestawu butli magazynujących i ponowne jego rozprężanie do zbiornika pojazdu oraz związane z tym efekty ogrzewania przy sprężaniu i chłodzenia przy rozprężaniu gazu. Wolne tankowanie wprowadza więcej gazu do zbiornika, co wiąże się z małym wzrostem temperatury podczas sprężania rozłożonym w czasie. W przypadku szybkiego tankowania gaz ziemny wprowadza się do zbiornika pod wysokim ciśnieniem, który podczas rozprężania oziębla się, ale w tym samym czasie drugim końcu zbiornika następuje ogrzewanie podczas jego sprężania. Znaczna różnica temperatur obserwowana jest przez kilka sekund. Ciśnienie w zbiorniku po osiągnięciu temperatury otoczenia nieznacznie spada, dlatego na stacji paliw rozliczanie się z użytkownikiem pojazdu z ilości gazu ziemnego należy dokonywać w jednostkach masy. W systemie wolnego napełniania na stacjach o dużej wydajności wykorzystuje się dla pojedynczych lub kilku pojazdów sprężarki o małych wydatkach gazu. Dla większej ilości pojazdów gazowych nawet kilkudziesięciu napełnianych gazem jednocześnie wykorzystuje się sprężarki o większym wydatku podłączone do tak zwanej rampy. Szybkie tankowanie zbiorników w pojazdach trwa zaledwie kilka minut w zależności od rodzaju pojazdu (3 do 10 minut, w przypadku pojazdów bardzo dużych czas może być dłuższy). Czas ten jest porównywalny z tankowaniem zbiorników na benzynę i olej napędowy, ale wymaga stosowania sprężarek o większych wydatkach gazu. W systemie szybkiego tankowania wymagany jest kaskadowy układ magazynowania sprężonego gazu w butlach przystosowany do jego szybkiego rozładowania. Przedsiębiorstwa transportu samochodowego najczęściej korzystają z własnej stacji tankowania paliw płynnych, natomiast dla otwartej stacji tankowania sprężonym gazem ziemnym lepszym rozwiązaniem byłoby utworzenie przedsiębiorstwa będącego zarazem dostawcą sprężonego gazu ziemnego. Utworzone przedsiębiorstwo powinno wybudować i eksploatować stację tankowania sprężonym gazem ziemnym oraz dostarczać gaz ziemny do tankowania pojazdów

przedsiębiorstwa transportowego na podstawie wieloletniego kontraktu z możliwością jego przedłużenia. Takie rozwiązanie pociągałoby za sobą wydzielenie na terenie bazy transportowej terenu na postawienie kontenerowej lub stałej stacji tankowania oraz zagwarantowanie odbioru minimalnej ilości gazu ziemnego i wynikającej z tego uzgodnionej jednostkowej ceny sprężonego gazu ziemnego. Autobusy w odróżnieniu od innych pojazdów nie wymagają zwykle szybkiego tankowania w określonym i krótkim okresie czasu. Zakłada się, że codziennie z usług stacji obsługiwanych przez operatora przez dwadzieścia cztery godziny na dobę siedem dni w tygodniu mogłyby korzystać w przeciągu pierwszych 2-3 lat, co najmniej 20-30 pojazdów. Ogólnodostępne stacje tankowania sprężonym gazem ziemnym powinny utworzyć określoną sieć stacji, przynajmniej na wybranych trasach. Prognozuje się, że w Polsce w roku 2010 sieć stacji tankowania sprężonym gazem ziemnym powinna liczyć około 130 jednostek. W planowaniu stacji tankowania ważny jest dobry dojazd, miejsce do równoczesnego tankowania wielu pojazdów i lokalizacja stacji, które powinny być raczej budowane na obrzeżach miast przy obwodnicach lub miejscach dobrego dojazdu dla użytkowników. Przewidywane stacje tankowania dla początkowego okresu rozwoju sieci sprężonego gazu ziemnego przedstawiono na mapie Polski [4, 6]. Przemieszczanie się na długich trasach ciężkich pojazdów transportowych typu „tiry” jest działalnością samodzielną, dlatego stacje tankowania gazem ziemnym powinny być od siebie oddalone nie dalej niż 50-70 kilometrów a ich geograficzne usytuowanie na trasach Europy będzie miało zasadnicze znaczenie.

Zbiorniki na sprężony gaz ziemny są atestowane na ciśnienie i wytrzymałość mechaniczną dając pełną gwarancję bezpieczeństwa, przy czym zbiorniki w pojazdach powinny być lekkie, odporne na korozję i chemikalia na drodze. Kształty zbiorników są najczęściej cylindryczne ze względu na korzystny stosunek powierzchni do objętości oraz stosunek technologiczny długości do średnicy waka. Dotychczas jednym z głównych mankamentów pojazdu na gaz ziemny była nadmierna waga zbiorników stalowych, które obecnie zastępowane są zbiornikami lżejszymi z materiałów kompozytowych, aluminium i stopów metali. W odniesieniu do zbiornika ze stali redukcja masy zbiornika kompozytowego na jednostkę objętości wynosi nawet do 70%. Materiałami konstrukcyjnymi kompozytów są włókna szklane, węglowe i aramidowe (kevlar), tworzywa sztuczne (polietylen), żywice termoutwardzalne (epoksydowa, poly-amidowa) i ester cyjanianowy. Poza tym zbiorniki kompozytowe w porównaniu ze zbiornikami stalowymi są bardziej odporne chemicznie, mniej podatne na zmianę właściwości w niskich temperaturach i są elektrycznymi izolatorami. Wyznaczone objętości zbiorników w zakresie 50-150 litrów wody z danych interpolowanych dla zbiorników kompozytowych

firmy Lincoln, zgodnych z normami USA, magazynują odpowiednio od 12,5 do 38 m<sup>3</sup> gazu, o gęstości względnej 0,6 przeliczonego na ciśnienie 0,1 MPa i temperaturę 15°C. Z danych tych wynika, że masa zbiornika plus masa maksymalnie sprężonego gazu wynoszą, dla wcześniej podanego zakresu objętości zbiornika, od 25 do 60 kg, z czego masa gazu stanowi od 35% do 45% odpowiednio do wzrostu wielkości zbiorników w kształcie cylindra, których wymiary odpowiadają szerokości od 0,35 do 0,40 metra i długości od 0,8 do 1,6 metra. Zbiorniki ciśnieniowe pod względem konstrukcji dzieli się najczęściej na całkowicie metalowe, metalowe wzmocnione kompozytami i na całkowicie kompozytowe. W pojazdach ciężkich (w tym autobusach) zbiorniki umieszczone są na dachu albo jako fragmenty płyty podłogowej pojazdu, tak aby przewody paliwowe były poza przestrzenią pasażerską lub ładunkową. Dwa przeciwstawne sobie czynniki masa zbiornika i zasięg pojazdu wymagają znalezienia odpowiedniej relacji pomiędzy nimi dla poszczególnych rodzajów pojazdów. W literaturze pojawiły się doniesienia dotyczące magazynowania w butlach o identycznej objętości większej ilości gazu, pod ciśnieniem znacznie niższym niż maksymalne ciśnienie sprężonego gazu ziemnego, oparte o adsorpcję gazu w monolitycznym adsorbencie węglowym o określonej porowatości powierzchni wewnętrznej zbiornika. Technologia powyższa zredukowałaby koszty sprężania gazu i pozwoliłaby na znaczne obniżenie ciśnienia w stacjach tankowania gazem ziemnym, dając zarazem możliwość bezpośredniego poboru gazu do zbiornika w pojeździe z wysokociśnieniowej sieci przesyłowej.

Do napędu pojazdu za pomocą gazu ziemnego może być przystosowany dowolny pojazd używany, ale nie starszy niż kilka lat. Zazwyczaj wymiana pojazdów na nowe wymusza wprowadzanie silnika nowej generacji. Silniki wykorzystywane obecnie do napędu pojazdów na gaz ziemny można podzielić na: silniki o zapłonie iskrowym napędzane tylko gazem ziemnym, silniki o podwójnym paliwie (bi-fuel) z automatycznym przełączeniem wykorzystujące albo benzynę albo gaz ziemny, przerobione silniki o zapłonie samoczynnym i wysokoprężne silniki dwupaliwowe (dual-fuel) jeżdżące na oleju napędowym albo jednocześnie na gazie ziemnym i oleju napędowym. Jediną główną różnicą pomiędzy pojazdem na gaz ziemny i benzynę jest układ paliwowy. Sprężony gaz ziemny ze zbiornika w pojeździe jest podawany do silnika w mieszance z powietrzem po obniżeniu ciśnienia gazu do wartości charakterystycznej dla typu silnika, zwykle do ciśnienia atmosferycznego. Konkurencyjność pojazdu określa się kosztem eksploatacji, wygodą pasażera, zasięgiem przebiegu, mocą silnika i prędkością pojazdu. Obecnie cena gazu ziemnego jest około dwa razy niższa niż benzyny silnikowej, ale cena jest kosztem nieznacznego spadku minimalnej mocy samochodu a w konsekwencji słabszego przyspieszenia pojazdu i trochę niższej maksymalnej prędkości na poszczególnych biegach. Dla pojazdów lekkich doświadczalne

dane eksploatacyjne (nie teoretyczne wyliczone z ciepła spalania) pokazują, że jeden kilogram gazu ziemnego równoważy zużycie 1,3 litra benzyny i 1,2 litra oleju napędowego, natomiast w przeliczeniu na metr sześcienny odpowiada to około 1,2 litra benzyny lub około 1,1 litra oleju napędowego, co potwierdzają dane tab. 2. Natomiast z dotychczasowych danych eksploatacji autobusów relacja ta jest mniej korzystna i wynosi 1 litr oleju napędowego na około 1,3 m<sup>3</sup> gazu ziemnego, która to wartość zaniża się nawet do 1,2 m<sup>3</sup> w miarę zdobywania doświadczeń eksploatacyjnych. Zmiana parametrów dynamicznych i ładowność pojazdu dla silników nowej generacji jest prawie nie odczuwalna, natomiast zamiana ciężkich zbiorników stalowych na kompozytowe może zwiększyć zasięg pojazdu lekkiego nawet do 500 kilometrów. W autobusach pojemność butli na sprężony gaz wynosi średnio 800 litrów, co pozwala na magazynowanie około 200 m<sup>3</sup> gazu ziemnego. Ilość ta pozwala przejechać 400 kilometrów przy założeniu zużycia gazu 50 m<sup>3</sup> (ekwiwalent 38 litrów oleju napędowego) na 100 kilometrów. Samochody osobowe ten sam zasięg osiągną przy dwóch butlach 80 litrowych (założono zużycie 10 m<sup>3</sup> gazu ziemnego na 100 km).

Również skroplony gaz ziemny jest wykorzystywany w coraz większej ilości pojazdów. Na świecie (USA, Japonia, Kanada, Niemcy, ...) jeżdżą już pojazdy na skroplony gaz ziemny korzystające z kilkunastu stacji tankowania, w tym ogólnodostępnych. Stan skroplony gazu ziemnego ma szereg zalet, szczególnie do pojazdów ciężkich: trzy razy wyższa od gazu sprężonego „gęstość energetyczna”, magazynowany w mniejszej objętości, szybkość napełniania pojazdu dużego zmniejsza się do 4-6 minut, skład paliwa to prawie czysty metan, co prowadzi do optymalizacji wykorzystania silnika i zwiększania jego ekonomiczności oraz obniżenie emisji zanieczyszczeń. Skroplony gaz ziemny dostarczany jest najczęściej w systemach dostawczych samochodów, podobnych do system ropopochodnych paliw ciekłych, do pojemności 44000 litrów oraz w mniejszych zbiornikach samochodowych, kolejowych i żeglugi wodnej. Skroplony gaz ziemny często jest wytwarzany lokalnie. W USA i Kanadzie instalacji lokalnych jest około 100, ale głównie budowane są duże instalacje skraplania gazu ziemnego, których w USA jest 70 w porównaniu z 170 rafineriami produkującymi benzynę. Na długich trasach pomiędzy miastami nie ma najczęściej stacji tankowania gazem ziemnym, dlatego w USA i Wielkiej Brytanii duże pojazdy przystosowano do zasilania skroplonym gazem ziemnym. W przemyśle gazowniczym podnoszenie ciśnienia i magazynowanie cieczy kriogenicznych przez odparowanie i magazynowanie w zbiornikach ciśnieniowych jest praktykowane od ponad pięćdziesięciu lat, dlatego zastąpienie sprężarek do wytwarzania sprężonego gazu ziemnego przez odparowanie skroplonego gazu ziemnego nie powinno sprawiać problemów. Skroplony gaz ziemny poza napędem długodystansowych pojazdów ciężkich, może być używany w miejscach gdzie nie ma sieci gazowej lub jest oddalona od miejsca jego użytkowania, poza tym po podgrzaniu wytwarza wysokie ciśnienie w objętości

zamkniętej, co stwarza efektywny sposób jego zamiany na sprężony gaz ziemny, a także może być pompowany bezpośrednio do bezciśnieniowego kriogenicznego zbiornika w pojeździe. Zazwyczaj skroplony gaz ziemny jest magazynowany w specjalnych zbiornikach kriogenicznych z izolacją próżniową o objętości roboczej od 70 do 470 litrów. Przepływ ciepła do zbiornika kriogenicznego przez konwekcję i promieniowanie jest minimalizowany poprzez wielowarstwową izolację i utrzymywanie pomiędzy ściankami zbiornika próżni rzędu  $10^6$  torra (ciśnienie 1 torr = 1 mm Hg). Konstrukcja taka redukuje przepływ ciepła czterokrotnie w porównaniu z konwencjonalnymi zbiornikami ciśnieniowymi i pozwala na przechowanie paliwa w pojeździe w postaci skroplonej przez wiele dni, zanim przepływ ciepła nie wymusi ciśnienia w zbiorniku powyżej 0,4 MPa.

Kontynuacja tematyki niniejszego artykułu nastąpi w następnym numerze czasopisma *Nowoczesne Gazownictwo* „Gaz ziemny paliwem optymalnym do napędu pojazdów - cz.2. Przesłanki i rozwój rynku”, poprzez omówienie sugestii i faktów w zakresie rozwoju rynku motoryzacyjnego w oparciu o gaz ziemny, jako paliwo silnikowe.

## **Literatura**

- [1] Warowny W.: *Ciepłownictwo w Polsce i na świecie*, 6(9/10) (1999).
- [2] Warowny W., Tkacz A.: *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 75 (8) (2001).
- [3] Cran & Stenning Technology, Inc., GURF - Joint Industry Project Proposal "Coselle CNG Carrier", Meeting of the Gas Utilisation Research Forum, San Francisco, December 17, 1998.
- [4] Tkacz A., Warowny W.: *Gaz ziemny paliwem zastępczym w komunikacji miejskiej*, Konferencja Gaz ziemny w transporcie miejskim, O/PZG Gdańsk, 30 października 2001 r.
- [5] Warowny W.: *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 75 (3) 2001.
- [6] Tkacz A., Warowny W.: *Nowoczesne Gazownictwo*, 4(VI) 2001 r.