*Jerzy MERKISZ**
Stanisław RADZIMIRSKI

Czy gaz propan-butan jest paliwem ekologicznym?

W artykule przedstawiono analizę porównawczą silników zasilanych LPG i benzyną pod kątem emisji związków toksycznych. Omówiono pojazdy przystosowane do zasilania gazem płynnym oraz ustalono kryteria oceny ich właściwości ekologicznych. Porównano właściwości ekologiczne obu rodzajów zasilania i dokonano oceny poszczególnych generacji układów LPG.

Słowa kluczowe: *silnik spalinowy, zasilanie gazowe, gaz propan-butan, emisja związków toksycznych*

Is LPG an ecological fuel?

The article presents a comparative study of LPG and gasoline fuelled vehicles in terms of their emission level. Vehicles adapted for the LPG fuelling have been scrutinized and the assessment criteria of their ecological properties have been ascertained. Ecological properties of both fuelling systems have been compared and an assessment of the subsequent LPG system generations has been performed.

Key words: *combustion engine, gaseous fuelling, LPG, toxic emission*

1. Wprowadzenie

Płynny gaz propan-butan, zwany w skrócie LPG, jest powszechnie uznawany za paliwo ekologiczne do napędu pojazdów samochodowych. W związku z tym wiele krajów, w tym Polska, wprowadziło zachęty do jego stosowania. Zachęty te mają różną formę, przy czym najczęstszą z nich jest niski podatek akcyzowy, znacznie niższy niż nakładany na paliwa konwencjonalne: benzynę i olej napędowy, co prowadzi do niższej ceny detalicznej LPG i w efekcie do wzrostu popytu na pojazdy przystosowane do zasilania tym paliwem. W naszym kraju podatek akcyzowy przeliczony na jednostkę wartości opałowej paliwa jest w przypadku benzyny 3 razy większy niż nakładany na gaz płynny (odpowiednio około 0,048 zł/MJ i 0,016 zł/MJ).

W zamian za niski podatek akcyzowy oczekuje się, aby pojazdy zasilane gazem propan-butan cechowały się znacznie lepszymi właściwościami ekologicznymi niż zasilane benzyną. Celem niniejszego opracowania jest obiektywna analiza, w jakim stopniu oczekiwania te są obecnie w naszym kraju spełnione, i czy udzielanie zachęt do stosowania tego paliwa jest uzasadnione ze względów ekologicznych. Artykuł jest opracowany na podstawie badań dotyczących paliw alternatywnych prowadzonych w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie oraz literatury fachowej. Należy podkreślić, że w literaturze informacje dotyczące niektórych aspektów stosowania LPG do zasilania pojazdów, w tym właściwości ekologicznych, są często niedostateczne. Wynika to między innymi z braku zainteresowania pojazdami zasilanymi tym paliwem ze strony wielu ośrodków badawczych i większości producentów, uważających je za produkt niszowy, nie mający większych perspektyw rozwojowych.

1. Introduction

Liquefied petroleum gas also known as LPG is commonly understood to be an ecological fuel. Hence, many countries, including Poland, have introduced incentives to make it more popular. These incentives come in a variety of forms, but the most frequent is a reduced excise duty rate in comparison to conventional fuels: gasoline and diesel oil, which directly Pbs to a lower retail price of LPG, thus to a growth in the demand of LPG fuelled vehicles. In Poland, the excise duty calculated against the calorific value of a fuel is 3 times higher in the case of gasoline than LPG (respectively pln 0,048/MJ and pln 0,016/MJ).

In return for the lower excise duty, better ecological properties are expected from the LPG fuelled vehicles. The purpose of this study is an objective analysis of to what extent the expectations have been realized so far in Poland and whether any incentives as regards the use of LPG are ecologically substantiated. The article has been prepared based on the research on alternative fuels, done in Motor Transport Institute in Warsaw, and relevant literature. It should be noted that the coverage in the relevant professional literature as regards some aspects of LPG application, including its ecological properties, are very often insufficient. It is partly due to the limited interest in this type of fuel of research centers and manufacturers who see it as a niche product with limited prospects.

2. Vehicles fuelled by LPG

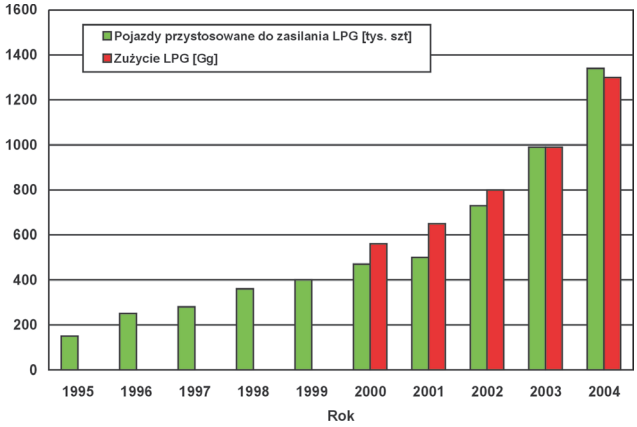
Since the beginning of 1990s, a rapid growth in the number of LPG fuelled vehicles has been continuing. A growth in the use of this fuel follows inevitably. In figure 1 relevant data for the period 1995–2004 have been presented.

The vehicles adapted for the use of LPG nearly always fall into two type-approval categories:

2. Park pojazdów przystosowanych do zasilania gazem płynnym propan-butan

Od początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia następuje w naszym kraju bardzo szybki wzrost liczby pojazdów przystosowanych do zasilania LPG. Towarzyszy temu równie szybki wzrost zużycia tego paliwa. Na rysunku 1 zestawiono odpowiednie dane dla okresu 1995–2004 r.

Pojazdy przystosowane do zasilania gazem płynnym należą prawie wyłącznie do dwóch kategorii homologacyjnych:
– M1 (samochody osobowe o liczbie miejsc, łącznie z miejscem kierowcy, nie większej niż 9),
– N1 (lekkie samochody ciężarowe o masie maksymalnej nie większej niż 3500 kg).



Rys. 1. Liczba pojazdów przystosowanych do zasilania LPG i zużycie LPG w latach 1995–2004 (dane szacunkowe)

Fig. 1. The number of LPG adapted vehicles and LPG consumption in the years 1995–2004 (estimate)

W celu porównania właściwości ekologicznych pojazdy zasilane gazem i benzyną należy podzielić na dwie podstawowe grupy:
– pojazdy konwencjonalne, wyposażone w przeważającej części w gaźnikowy układ zasilania benzyną,
– pojazdy niskoemisyjne Euro 1, Euro 2, Euro 3 i Euro 4, wyposażone we wtryskowy układ zasilania benzyną sterowany sondą lambda i w reaktor katalityczny potrójnego działania.

Eksploatowane pojazdy są wyposażone w instalacje LPG o różnym stopniu zaawansowania technicznego, od tzw. I generacji – tj. prymitywnych układów, które można porównać do gaźników stosowanych do zasilania benzyną około sześćdziesiąt lat temu – do IV generacji, które odpowiadają układom wtrysku benzyny pojazdów niskoemisyjnych. Pojazdy konwencjonalne są wyposażone wyłącznie w instalacje I generacji. Dla pojazdów niskoemisyjnych szacunkowe udziały poszczególnych generacji instalacji w 2004 r. w naszym kraju podano w tabeli 1.

Pojazdy są przystosowywane do zasilania LPG:
– przez producenta (pojazdy fabrycznie nowe),
– w wyniku adaptacji prowadzonej na zamówienie użytkownika.

Pojazdy nowe podlegają homologacji typu. Między wymaganiami homologacyjnymi dla pojazdów zasilanych LPG i benzyną występują dwie podstawowe różnice:
– M1 (passenger vehicles carrying not more than 9 people including the driver),
– N1 (light duty vehicles of GVW not exceeding 3500 kg).

In order to compare the ecological properties of the vehicles fuelled by LPG and gasoline we need to divide them into two basic groups:
– Conventional vehicles, mostly fitted with carburetor system,
– Low emission vehicles Euro 1, Euro 2, Euro 3 and Euro 4 fitted with injection fuel systems controlled by an oxygen sensor and equipped with a three way catalytic converter.

The vehicles in operation are fitted with LPG systems of different level of technological advancement, from generation I – primitive systems comparable to carburetors used in gasoline engines approximately 60 years ago – to generation IV that can briefly be compared to fuel injection systems of low emission vehicles. Conventional vehicles are fitted merely with LPG systems of generation I. For low emission vehicles, the estimates as regards the share of different generations in 2004 in Poland have been given in Table 1.

Vehicles are adapted for the LPG fuelling:
– by the manufacturer (brand new vehicles),
– on the driver's accord.

New vehicles are subject to the type approval procedure. There are two basic differences between LPG fuelled vehicles and gasoline fuelled ones:
– LPG fuelled vehicles must meet the requirements of part II of the regulation 67, series 01 amendments, regarding the fitting of the LPG system; one of such requirements is that the LPG systems must by type approved according to part I thereof; the regulations do not provide for such requirements as regards gasoline fuelled vehicles,
– The type approval for exhaust emissions may be issued for the whole family of vehicles fuelled by LPG, not just a single type.

Within the type approval procedure, the assessment for compliance of the following is performed:
– pollutant emissions in a type I test as per the directive 70/220/EEC or regulation 83,
– engine power as per the directive 80/1269/EEC or regulation 85,
– fuel consumption and CO_2 emission as per the directive 93/116/EEC or regulation 101.

For type-approval tests of LPG fuelled vehicles two reference fuels are used:
– composition A – 30 ±2% vol. propane, max. 2% vol. other, butane,
– composition B – 85 ±2% vol. propane, max. 2% vol. other, butane.

The emission requirements must be met when fuelled by both LPG and gasoline.

Since 2000 in Poland any workshop preoccupied with the fitting of the LPG system is required to obtain a type-approval certificate regarding the method of the said fitting. Within this homologation procedure compliance of vehicles for emission standards is ensured. For the tests two low emission vehicles must be submitted. The tests are performed as per the directive 70/220/EEEC or regulation 83 binding

– pojazdy zasilane LPG muszą spełniać wymagania części II regulaminu 67, seria 01 poprawek, dotyczące zabudowy instalacji gazu; jednym z takich wymagań jest to, że zespoły instalacji LPG muszą być homologowane zgodnie z częścią I tego regulaminu; w przepisach homologacyjnych nie ma takich wymagań dla układu zasilania benzyną,
– homologacja cząstkowa w zakresie emisji zanieczyszczeń może być udzielona dla rodziny pojazdów zasilanych LPG obejmującej więcej niż jeden typ.

W ramach homologacji typu pojazdu przeprowadza się m.in. ocenę zgodności z wymaganiami w zakresie:
– emisji zanieczyszczeń w teście typu I według dyrektywy 70/220/EWG lub regulaminu 83,
– mocy silnika według dyrektywy 80/1269/EWG lub regulaminu 85,
– zużycia paliwa i emisji CO_2 według dyrektywy 93/116/EWG lub regulaminu 101.

Do badań homologacyjnych pojazdów zasilanych LPG stosuje się dwa paliwa wzorcowe:
– skład A – 30 ±2% objętości stanowi propan, maksymalnie 2% objętości zajmują inne składniki, resztę stanowi butan,
– skład B – 85 ±2% objętości stanowi propan, maksymalnie 2% objętości zajmują inne składniki, resztę stanowi butan.

Wymagania w zakresie emisji zanieczyszczeń muszą być spełnione przy zasilaniu oboma paliwami.

W Polsce od 2000 r. podmiot gospodarczy zajmujący się montażem instalacji przystosowującej pojazd do zasilania gazem ma obowiązek uzyskania świadectwa homologacji na sposób jej montażu. W ramach tej homologacji sprawdzana jest między innymi zgodność pojazdów z wymaganiami w zakresie emisji zanieczyszczeń. Do badań należy przedstawić dwa pojazdy niskoemisyjne. Badania te prowadzi się według dyrektywy 70/220/EWG lub regulaminu 83 obowiązujących w czasie, gdy dany pojazd był wprowadzony po raz pierwszy do eksploatacji. Stosuje się w nich wymienione paliwa wzorcowe A i B.

3. Kryteria oceny właściwości ekologicznych

Na właściwości ekologiczne pojazdów decydujący wpływ ma emisja zanieczyszczeń. W celu porównania LPG i benzyny należy uwzględnić:
– emisję dwutlenku siarki i ołowiu,
– emisję tzw. zanieczyszczeń kontrolowanych:
  • tlenku węgla,
  • węglowodorów,
  • tlenków azotu

  z układu wylotowego pojazdu,
– emisję zanieczyszczeń niekontrolowanych, np. aldehydów, benzenu, ciężkich węglowodorów aromatycznych,
– kontrolowaną emisję węglowodorów (par paliwa) z układu zasilania,
– emisję gazów cieplarnianych (decydujące znaczenie ma w tym przypadku dwutlenek węgla).

Jako kryterium oceny przyjęto w niniejszym opracowaniu emisję roczną zanieczyszczeń. Jest ona równa iloczynowi dwóch wielkości:

Tabela 1. Udziały poszczególnych generacji instalacji przystosowującej pojazdy niskoemisyjne do zasilania LPG (dane szacunkowe)

Table 1. Estimated share of particular generations of LPG systems for low emission vehicle group

Instalacja / *LPG system*	Udział w całym parku pojazdów przystosowanych / *Share in all adapted vehicles* [%]	Udział w pojazdach przystosowanych w 2004 r. / *Share in vehicles adapted in 2004* [%]
I generacja / *I generation*	49	17
II generacja / *II generation*	40	62
III generacja / *III generation*	3	3
IV generacja / *IV generation*	8	18

as at the time when the vehicle was introduced into operation for the first time. The already mentioned reference fuels A and B are used.

3. Ecological Properties Evaluation Criteria

The emission of pollutants from a vehicle has a direct effect on its ecological properties. In order to compare LPG and gasoline the following have to be considered:
– SO_2 and Pb exhaust emission,
– exhaust emission of controlled pollutants:
  • CO,
  • HC,
  • NO_x,
– non-controlled pollutants–aldehydes, benzene, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH),
– controlled hydrocarbon emission (fuel vapor) from the fuelling system,
– greenhouse gases emission (carbon dioxide is decisive in this case).

The annual emission has been presumed to be an evaluation criterion in this study. It equals the mathematical product of two quantities:
– specific road emission determining the emission mass per distance (g/km) and annual mileage

or
– emission factor determining the emission mass as a result of 1 kg fuel combustion (g/kg) and annual fuel consumption.

In regular operation as well as in the type I test as per the directive 70/220/EEC or regulation 83, the cold start and warm up cycles of an engine are performed on gasoline. Subsequently, the system switches to LPG. Thus, the vehicle operates in two phases: fuelled by gasoline and fuelled by LPG.

In order to define the operation of the fuelling system this study uses two terms „in the fueling mode" and „fuelling phase".

The term „in the LPG fuelling mode" denotes that the driver selected LPG as the main fuel. If the engine is cold during the start and warm up phases gasoline may be used for the combustion process. The switch to LPG will be ef-

– jednostkowej emisji drogowej, określającej masę zanieczyszczenia wydalaną na jednostkę przebiegu (g/km) i przebiegu rocznego

lub

– wskaźnika emisji określającego masę zanieczyszczenia wydalaną w wyniku spalania jednostki masy paliwa (g/kg) i rocznego zużycia paliwa.

W eksploatacji, a także w teście typu I według dyrektywy 70/220/EWG lub regulaminu 83, rozruch silnika i początek nagrzewania samochodu następują zazwyczaj przy zasilaniu benzyną, a następnie następuje przełączenie na zasilanie LPG. Pojazd pracuje więc w dwóch fazach: przy zasilaniu benzyną i LPG.

W niniejszym opracowaniu w celu zdefiniowania pracy układu zasilania stosowane są dwa określenia „w trybie zasilania" i „przy zasilaniu".

Określenie „w trybie zasilania LPG" oznacza, że kierowca wybrał jazdę przy zasilaniu LPG. W przypadku nienagrzanego samochodu rozruch oraz nagrzewanie może następować przy pracy na benzynie. Przełączenie na zasilanie gazem następuje automatycznie lub jest dokonywane ręcznie przez kierowcę. W przypadku benzyny oznacza ono, że pojazd pracuje w identycznych warunkach jak „w trybie zasilania LPG". Natomiast określenie „przy zasilaniu LPG" oznacza pracę w fazie zasilania gazem trybu zasilania gazem. W przypadku benzyny oznacza ono, że pojazd pracuje w identycznych warunkach jak w wyżej wymienionej w fazie zasilania LPG.

Różnica między obu określeniami jest przedstawiona niżej na przykładzie pojazdu pracującego w europejskim cyklu jezdnym (rys. 2), w którym przełączenie z zasilania benzyną na zasilanie gazem następuje w końcu pierwszego elementarnego cyklu miejskiego. W takim przypadku:

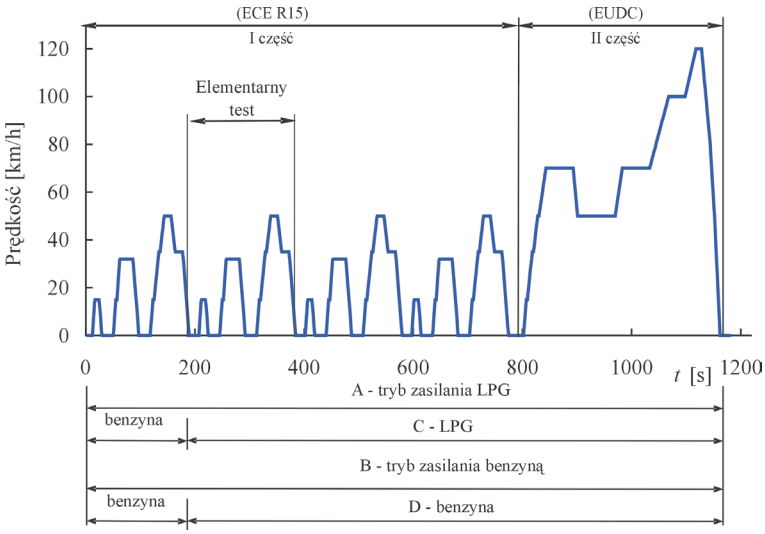
– „emisja w trybie zasilania LPG" (symbol A, rys. 2) oznacza masę zanieczyszczenia wydalonego w całym cyklu jezdnym, tzn. w czterech elementarnych cyklach miejskich i cyklu zamiejskim; jest ona równa masie zanieczyszczenia wydalonego w pierwszym elementarnym cyklu miejskim podczas pracy na benzynie oraz w drugim, trzecim i czwartym cyklu miejskim oraz w cyklu zamiejskim podczas pracy przy zasilaniu LPG,
– „emisja w trybie zasilania benzyną" (symbol B) oznacza masę zanieczyszczenia wydalonego w takich warunkach pracy, jakie wystąpiły „w trybie zasilania LPG", a więc w całym cyklu jezdnym, tzn. w czterech elementarnych cyklach miejskich i cyklu zamiejskim przy pracy na benzynie,
– „emisja przy zasilaniu LPG" (symbol C) oznacza masę zanieczyszczenia wydalonego w drugim, trzecim i czwartym cyklu miejskim oraz w cyklu zamiejskim podczas pracy przy zasilaniu LPG,
– „emisja przy zasilaniu benzyną" (symbol D) oznacza masę zanieczyszczenia wydalonego w takich warunkach pracy, jakie wystąpiły „przy

fected automatically or manually by the driver. In the case of gasoline it means that the engine operates in identical conditions as in „the LPG fuelling mode". The term „fuelling phase" denotes operation in the phase of the LPG fuelling in the LPG fuelling mode. In the case of gasoline it means that the engine operates in identical conditions as in the above mentioned the LPG fuelling phase.

The difference between the two terms is described below on the example of a vehicle operating in the European driving cycle (Fig. 2) where the switch from gasoline to LPG is effected in the end of the first elementary urban cycle. In such a case:

– „emission in the LPG fuelling mode" (symbol A, Fig. 2) denotes the mass of the emission released in the whole driving cycle i.e. four elementary urban cycles and an extra urban cycle; it equals the emission mass released in the first elementary urban cycle in the gasoline fuelling phase and in the second, third and fourth urban cycle and extra urban cycle in the LPG fuelling phase,
– „emission in the gasoline fuelling mode" (symbol B) denotes the mass of the emission released in such operating conditions that occurred in the LPG fuelling mode, hence, in the whole driving cycle i.e. in the four elementary driving cycles and an extra urban cycle in the gasoline fuelling phase,
– „emission in the LPG fuelling phase": (symbol C) denotes the mass of the emission released in the second, third and fourth urban cycle and in the extra urban cycle in the LPG fuelling phase,
– „emission in the gasoline fuelling phase" (symbol D) denotes the mass of the emission released in such operating conditions that occurred in the LPG fuelling phase i.e. in the second, third and fourth urban cycle and in the extra urban cycles in the gasoline fuelling phase.

The operation in the gasoline fuelling phase in the LPG fuelling mode makes it difficult to compare the emissions for the two fuels. In order to compare the emissions we need



Rys. 2. Schemat wyjaśniający zasady oceny emisji

Fig. 2. A graph representing the principles of the evaluation of emissions

zasilaniu LPG", a więc w drugim, trzecim i czwartym cyklu miejskim oraz w cyklu zamiejskim podczas pracy przy zasilaniu benzyną.

Praca na benzynie w trybie zasilania gazem utrudnia porównanie emisji zanieczyszczeń dla obu paliw. Do porównania należy w tym przypadku przyjąć hipotetyczne wartości jednostkowej emisji drogowej lub wskaźnika emisji, które byłyby uzyskane, gdyby pojazd w fazie zasilania gazem pracował przy zasilaniu benzyną. To samo dotyczy przebiegów (punkt 4).

4. Przebiegi pojazdów

Roczne przebiegi pojazdów zasilanych LPG są średnio znacznie większe niż zasilanych benzyną. Wskazuje na to między innymi roczne zużycie tych paliw przez jeden pojazd, które np. dla konwencjonalnych samochodów osobowych przy zasilaniu gazem wynosiło w 2004 r. około 550 kg/rok, a przy zasilaniu benzyną – około 160 kg/rok. Odpowiednie wartości dla niskoemisyjnych samochodów osobowych były następujące: około 1300 kg/rok i około 650 kg/rok. Z tych danych wynika, że przy zasilaniu gazem średni przebieg samochodów konwencjonalnych był w przybliżeniu 3,5, a niskoemisyjnych – 2 razy większy. Wartości tych nie można jednak użyć do analizy będącej przedmiotem niniejszego opracowania, gdyż dotyczą one różnych samochodów eksploatowanych przez różnych użytkowników. Duże różnice w rocznym zużyciu paliwa wynikają między innymi z tego, że przystosowaniu do zasilania LPG podlegają przede wszystkim pojazdy większe (o większej masie własnej i mocy silnika) i o dużych przebiegach rocznych. Dla potrzeb takiej analizy niezbędne jest oszacowanie hipotetycznych przebiegów, które miałyby pojazdy przystosowane obecnie do zasilania LPG, gdyby nie zostały przystosowane i pracowały przy zasilaniu benzyną, lub też gdyby LPG nie był dostępny.

Przeprowadzone szacunki wykazały, że ze względu na mniejsze koszty paliwa średnie przebiegi roczne pojazdów zasilanych LPG są większe o co najmniej 20%, niż gdyby pracowały one przy zasilaniu benzyną.

5. Emisja dwutlenku siarki i ołowiu

Emisja dwutlenku siarki i ołowiu z pojazdów zależy prawie wyłącznie od zawartości siarki i ołowiu w paliwie. W przeszłości istotnymi zaletami LPG w porównaniu z benzyną była mała zawartość siarki (jej całkowita dopuszczalna zawartość po wprowadzeniu substancji zapachowych wynosi 50 mg/kg) i zerowa zawartość ołowiu. Obecnie w związku ze znaczną poprawą jakości benzyn (tab. 2), zalety te utraciły swoje znaczenie.

6. Emisja kontrolowanych zanieczyszczeń z układu wylotowego

Emisja tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu z układu wylotowego stanowi najważniejsze kryterium oceny właściwości ekologicznych pojazdów przy zasilaniu gazem płynnym i benzyną.

Liczne prace badawcze prowadzone od wielu lat wykazują, że ten sam silnik zasilany gazem płynnym cechuje się,

to assume hypothetical values of specific road emissions or the emission factors that would result if the vehicle operated in the gasoline fuelling phase in the LPG fuelling mode. The same goes with the mileage (4 below).

4. Vehicle mileage

Annual mileage of LPG fuelled vehicles is, on average, higher than that of the gasoline fuelled ones. This is shown by the annual consumption of these fuels by a single vehicle which in 2004 amounted to: 550 kg/year for conventional passenger vehicles in the LPG fuelling phase and 160 kg/year in the gasoline fuelling phase. For low emission passenger vehicles the values were as follows: approx. 1300 kg/year and approx. 650 kg/year respectively. The available data hint that in the LPG fuelling phase the average conventional vehicle mileage was, c.a. 3.5 times higher and the low emission passenger vehicle mileage was 2 times higher. Howevr, these values cannot be used for the analysis here presented as the values represent different vehicles operated by different users. Such large differences in the annual fuel consumption are due to the fact that it is mostly larger vehicles (higher curb weight and engine power) with higher annual mileage that are adapted for the LPG fuelling. For the purpose of such an analysis it is necessary to estimate hypothetical mileage of vehicles adapted for the LPG fuelling if they were not adapted for the LPG fuelling and worked in the gasoline fuelling phase only or if LPG was not available.

The performed estimates disclose that due to lower fuel costs the average annual LPG fuelled vehicle mileage is higher by at least 20% as compared to the mileage of a gasoline fuelled one.

5. SO_2 and Pb emission

SO_2 and Pb vehicle emission is almost exclusively dependent on the sulphur and lead content in the fuel. In the past, the advantage of LPG over gasoline was low sulphur content (its maximum content was 50 mg/kg after the addition of aromatic substances) and zero lead content. Currently, owing to a much better gasoline quality (Tab. 2) these advantages have lost their significance.

Tabela 2. Średnie wskaźniki emisji dwutlenku siarki i ołowiu [g/kg] pojazdów zasilanych benzyną i LPG (wartości szacunkowe)

Table 2. Estimated average emission of SO_2 ad Pb [g/kg] in gasoline and LPG fuelled vehicles (estimates)

Rok / *Year*	Zasilanie benzyną / *The gasoline fuelling*		Zasilanie LPG / *LPG fuelling*	
	SO_2	Pb	SO_2	Pb
1995	1,3	0,086	0,07	0
1998	1,3	0,045	0,07	0
2000	1,0	0,008	0,07	0
2004	0,3	0,005	0,07	0
2005	0,1	0,005	0,07	0

przy takim samym składzie mieszanki paliwowo-powietrznej, mniejszą emisją jednostkową tlenku węgla i węglowodorów niż przy zasilaniu benzyną. Różnice są na ogół zawarte w granicach 10–30%.

W przypadku tlenków azotu wyniki porównań nie są jednoznaczne. Część badań wykazuje, że emisja jednostkowa tego zanieczyszczenia jest mniejsza przy zasilaniu LPG, natomiast inne badania wykazują jej wzrost.

Teoretycznie, pojazdy zasilane gazem płynnym powinny charakteryzować się przeciętnie lepszymi właściwościami pod względem emisji kontrolowanych zanieczyszczeń niż zasilane benzyną. W praktyce jednak trudność polega na doborze takiej charakterystyki dawkowania paliwa dla całego pola pracy silnika oraz regulacji innych parametrów wpływających na parametry pracy silnika i emisję zanieczyszczeń, by potencjalne możliwości tego paliwa były w pełni wykorzystane.

W instalacjach I generacji stosowanych w pojazdach konwencjonalnych możliwości kształtowania charakterystyki dawkowania w całym zakresie pracy silnika, zarówno w warunkach ustalonych, jak i nieustalonych, są na ogół mniejsze niż w przypadku gaźnika lub układu wtryskowego, między innymi z tego względu, że nie mają one oszczędzacza. W rezultacie charakterystyka ta przy zasilaniu LPG zazwyczaj odbiega od charakterystyki wymaganej dla danego typu silnika. Dokładniejsze jej odwzorowanie wymagałoby komplikacji konstrukcyjnej, a zatem wzrostu ceny instalacji. Właściwości gazu płynnego kompensują jednak w pewnym stopniu odchylenia od charakterystyki wymaganej.

Przy zasilaniu gazem następuje przesunięcie górnej granicy palności w kierunku ubogich mieszanek. Powoduje to znaczne zwiększenie zakresu mieszanek ubogich ($\lambda > 1$) w porównaniu z zasilaniem benzyną, przy których występuje prawidłowa praca silnika, a w związku z tym umożliwia uzyskiwanie mniejszej emisji tlenku węgla i węglowodorów, a także mniejszego zużycia energii. Doświadczenia zebrane w czasie prac w ITS wykazują, że ta zaleta LPG nie jest jednak wykorzystywana. Warsztaty wykonujące montaż instalacji zwracają głównie uwagę na to, by po adaptacji nie wystąpiły niedomagania, które spowodują reklamację użytkownika, w szczególności:
– nadmierny spadek mocy silnika,
– nierównomierna praca silnika, jego „gaśnięcie" przy zmianie obciążenia, „wypadanie" zapłonów i „strzały" w układzie dolotowym.

W silnikach wyposażonych w instalacje I generacji mogą w eksploatacji występować stosunkowo duże wahania składu mieszanki, zarówno jej wzbogacenie, jak i zubożenie, wynikające między innymi ze względu na:
– zmienność składu gazu,
– stosowanie regulatorów ciśnienia o niezrównoważonym drugim stopniu.

Utrudniają one dobór właściwej charakterystyki dawkowania paliwa.

Zawartość propanu w przeważającej części LPG waha się od 18 do 55% objętości. Stosunek zawartości propanu do butanu wpływa na współczynnik nadmiaru powietrza

6. Exhaust emission of controlled pollutants

The exhaust emission of carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides constitutes the most important criterion for the evaluation of ecological properties of vehicles fuelled by gasoline and LPG.

Numerous investigations continued for years have shown that the same engine with identical fuel air mixture is characterized by a lower CO and HC emission if it is fuelled by LPG, not gasoline. The differences usually remain in the margin of 10–30%.

As is for nitrogen oxides, the results are ambiguous. Some of the investigations show that the emission is lower in the case of the LPG fuelling others show the opposite .

In theory, vehicles run on LPG should, on average, show better ecological properties in terms of controlled pollutants. In practice, however, the difficulty of taking a full advantage of the properties of this fuel lies within the appropriate choice of fuel dosage characteristics for the whole range of engine operation as well as adjustments of other parameters influencing the engine operation and emissions.

In generation I systems, applied in conventional vehicles, the possibilities to control the characteristics of fuel dosage in the whole range of engine operation for both determined and undetermined conditions are usually more limited than in the case of a carburetor or fuel injection system engines. It is partly because these engines do not have „economizers". As a result, the characteristics, when fuelled by LPG, strays from that required for this type of engine. Its detailed representation would require more complex solutions on the design stage, thus an increase in the price of the LPG system. The properties of LPG, however, to some extent, make up for such deviations from the required characteristics.

When run on LPG, the top limit of flammability is shifted into the region of lean mixtures. This results in an increase of the range of the region of lean mixtures ($\lambda > 1$) as compared to gasoline combustion, in which case proper engine operation takes place, which allows a reduction in CO and HC emissions and lower energy consumption. The experience gained during the research at ITS shows that this advantage of LPG is not taken advantage of. Specialized workshops, when fitting the LPG systems pay particular attention to and avoid any malfunctions after adapting an engine that would lead to warranty claims, particularly:
– excessive power loss,
– uneven engine operation, „choking" at load changes, „misfires" and shots in the inlet manifold.

In the engines fitted with generation I systems relatively high mixture variations may occur- from excessively rich to excessively lean – as a result of:
– fuel composition,
– the application of dual stage pressure regulators with unbalanced second stage.

They make it difficult to properly select the characteristics of fuel dosage.

The content of propane in LPG varies from 18 to 55% vol. The ratio of propane content to butane influences the

w samochodach nie wyposażonych w sondę lambda. Teoretycznie, przy zmianie zasilania z czystego propanu na czysty butan następuje wzbogacenie mieszanki z $\lambda = 1$ do 0,77. W przypadku wahania zawartości propanu w podanych granicach współczynnik nadmiaru powietrza może się różnić o $\Delta\lambda = 0{,}08$, w wyniku czego może nastąpić znaczna zmiana emisji zanieczyszczeń, w szczególności CO (nawet o ponad 100%) i HC oraz zużycia paliwa (o około 4–5%).

Niezrównoważony drugi stopień reduktora powoduje, że w miarę wzrostu zanieczyszczenia filtra powietrza następuje stopniowe zmniejszenie, a po jego oczyszczeniu lub wymianie, skokowy wzrost współczynnika nadmiaru powietrza.

Z wyżej wymienionych względów mieszanka paliwowo-powietrzna ustawiona podczas montażu instalacji przystosowującej do zasilania LPG jest przeciętnie bogatsza od stechiometrycznej ($\lambda \sim 0{,}9$–$1{,}0$).

Ocenia się, że średnia jednostkowa drogowa emisja tlenku węgla i węglowodorów przy nagrzanym samochodzie jest mniejsza przy zasilaniu LPG niż benzyną. Zaletą zasilania gazem jest to, że podczas nagrzewania silnika nie jest wymagane wzbogacenie mieszanki. Ta zaleta ma szczególne znaczenie przy niskich temperaturach otoczenia. Uwzględniając wszystkie wymienione czynniki szacuje się, że w eksploatacji przy zasilaniu LPG średnie wskaźniki emisji tlenku węgla i węglowodorów pojazdów konwencjonalnych są mniejsze niż przy zasilaniu benzyną (odpowiednio o około 50 i 40%), natomiast wskaźnik dla tlenków azotu jest o około 10% większy [1].

Jednostkowa emisja drogowa i wskaźniki emisji zanieczyszczeń kontrolowanych z układu wylotowego pojazdów niskoemisyjnych zasilanych LPG zależą od generacji stosowanej instalacji.

W przypadku instalacji I generacji nie ma w zasadzie możliwości uzyskania poziomu emisji zbliżonego do zasilania benzyną. Na ogół emisja wszystkich zanieczyszczeń kontrolowanych jest wielokrotnie większa. W najlepszym przypadku uzyskuje się zbliżone wartości dla tlenku węgla i węglowodorów, przy znacznym wzroście dla tlenków azotu lub odwrotnie. Badania wykazują, że jednostkowa emisja drogowa tlenku węgla i węglowodorów mierzona w trybie zasilania LPG w teście typu I według regulaminu 83 lub dyrektywy 70/220/EWG jest około 4–7 razy, a tlenków azotu 3–5 razy większa niż przy zasilaniu benzyną. W skrajnym przypadku emisja tlenku węgla może być nawet ponad dwadzieścia razy większa.

W przypadku instalacji II generacji, część samochodów można wyregulować w ten sposób, aby emisja zanieczyszczeń kontrolowanych mierzona w teście typu I przy zasilaniu gazem płynnym była zbliżona do uzyskiwanej przy zasilaniu benzyną. Regulacja taka wymaga jednak użycia kompletnego wyposażenia do badań emisji i ma charakter indywidualny dla konkretnego samochodu. Przeniesienie jej zasad na inne samochody danego typu nie zapewnia uzyskania właściwych wyników w każdym przypadku. Zdarzają się samochody, w których emisja odpowiada w przybliżeniu uzyskanej przy zasilaniu benzyną, lecz również w wielu przypadkach następuje znaczny wzrost emisji niektórych zanieczyszczeń.

excess air coefficient in engines not equipped with the oxygen sensor. In theory, when switched from pure propane to pure butane the mixture is enriched from $\lambda = 1$ to 0.77. If the propane level varies within the given limits the excess air coefficient may vary by $\Delta\lambda = 0.08$, the result of which is a changed emission level, particularly CO (up to 100% and more), HC and fuel consumption (by approx. 4–5%).

The unbalanced second stage of the pressure regulator causes gradual decrease of excess air coefficient proportional to air filter impurity and after the replacement of the air filter an abrupt increase of the said coefficient.

For the above reasons the air fuel mixture set during the fitting of the LPG system is, on average, richer than stoichiometric ($\lambda \sim 0.9$–1.0).

It is estimated that the specific road emission of CO and HC when the engine is warm is lower when fuelled by LPG. The advantage of the LPG fuelling is that while the engine is in the warm up phase enriching of the mixture is not necessary. This is particularly significant when the ambient temperature is low. Considering all the mentioned factors it is estimated that the operation of conventional vehicles on LPG results in lower CO and HC emissions than in the case of the gasoline fuelling (by 50 and 40% respectively) but the nitrogen oxides emission is higher by approx. 10% [1].

Specific road emission and exhaust emissions of controlled pollutants from low emission LPG fuelled vehicles depend on the generation of the LPG system.

In the case of generation I LPG system it is virtually impossible to obtain emission levels comparable to the gasoline fuelling. The emission of all controlled pollutants is usually much higher. At best, the values only approximate the gasoline values for CO and HC while the nitrogen oxides level surges drastically. The investigation shows that the specific road emission of CO and HC measured in the LPG fuelling mode in test type I as per the regulation 83 or the directive 70/220/EEC is approximately 4–7 times higher, and the emission of nitrogen oxides 3–5 times higher. In extreme cases, the emission of CO may even be over 20 times higher.

In the case of generation II system, some of the vehicle engines may be adjusted so that the emission of controlled pollutants measured in test type I in the LPG fuelling phase is close to that in the gasoline fuelling phase. Such an adjustment requires a complete equipment for emission tests and is very individual in nature for each vehicle separately. Transferring the rules of such an adjustment on other vehicles of a given type does not ensure proper results in each case. There are vehicles for which the LPG emission is comparable to gasoline emission but still in many cases a significant increase in the emission of particular pollutants may occur.

In the case of generation III and IV systems, it is theoretically possible to obtain better results as compared to generation I systems. Practically, however, it all depends on a given LPG system and its adjustment. There are vehicles for which the LPG emission is comparable to gasoline emission in test type I but its range of variation may be greater. In some cases, on the other hand, the results are worse than those of the system of generation II and even I.

W przypadku III i IV generacji jest teoretycznie możliwe uzyskanie wyników lepszych niż dla II generacji. Jednak w praktyce zależy to od instalacji i jakości jej regulacji. Zdarzają się instalacje, w których dla danego typu pojazdu emisja w teście typu I jest zbliżona do uzyskiwanej przy zasilaniu benzyną, z tym, że jej rozrzut może być większy. W niektórych przypadkach wyniki są natomiast gorsze od osiągniętych przy zastosowaniu II, a nawet I generacji.

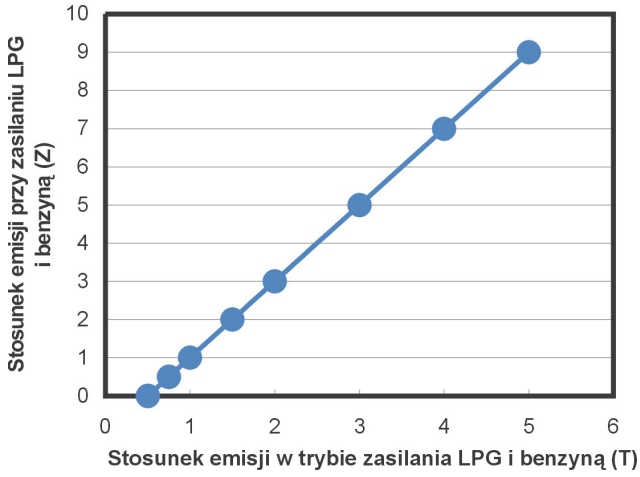
W tab. 3 przedstawiono wybrane wyniki badań emisji zanieczyszczeń w teście typu I w trybie zasilania LPG i benzyną.

Wyniki badań w teście typu I w trybie zasilania LPG stanowią sumę emisji określonej podczas pracy w fazach zasilania benzyną i gazem. W pojazdach niskoemisyjnych przełączanie na zasilanie gazem następuje po przejechaniu około 0,5–1,0 km. W tym czasie emisja zanieczyszczeń wynosi 40–70% całej emisji w teście typu I. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń stosunku emisji przy zasilaniu gazem i benzyną (Z = C/D) w funkcji stosunku emisji w trybie zasilania tymi paliwami (T = A/B).

Jeśli stosunek T jest większy od 1, to wzrost emisji przy zasilaniu LPG w porównaniu z benzyną jest większy niż w trybie zasilania LPG. Przykładowo, gdy T jest równy 3, to Z wynosi 5. Jeśli natomiast T jest mniejszy niż 1, to zachodzi sytuacja odwrotna.

7. Emisja z układu zasilania

Teoretycznie żadna emisja par paliwa nie powinna być wydalana z samochodów zasilanych gazem płynnym, gdyż ich instalacja powinna być szczelna. Jednak w praktyce w małej części samochodów instalacja zasilania LPG nie jest szczelna. Ponadto następuje na ogół niewielka emisja węglowodorów w chwili zatrzymania silnika oraz wypuszczanie par paliw przez różne zawory w przypadku przekroczenia ciśnień krytycznych emisji z układu zasilania gazem. Szacuje się, że w eksploatacji emisja z instalacji zasilania LPG stanowi około 10–20% emisji z układu zasilania pojazdów zasilanych benzyną nie przystosowanych do zasilania LPG.



Rys. 3. Stosunek emisji przy zasilaniu LPG i benzyną w funkcji stosunku emisji w trybie zasilania tymi paliwami (założenie: w trybie zasilania LPG emisja w fazie zasilania benzyną wynosi 50% całej wartości)

Fig. 3. Emission ratio on LPG and gasoline versus emission ratio in LPG and the gasoline fuelling mode (assumption: emission on gasoline in the LPG fuelling mode is equal to 50% of the total emission)

Table 3 presents selected exhaust pollutant test results of low emission vehicles running in LPG or gasoline modes from test type I.

The test results for type I in the LPG fuelling mode constitute the total emission determined while operating in both LPG and the gasoline fuelling phases. In low emission vehicles the switch to the LPG fuelling phase is done after approx. 0.5–1.0 km. Over such a distance the emission amounts to 40–70% of the total test type I emission. Figure 3 presents example results of the calculations of the emission ratio on LPG and gasoline versus the emission ratio in LPG and the gasoline fuelling mode (Z = C/D), (T = A/B).

Tabela 3. Wybrane wyniki badań emisji zanieczyszczeń z pojazdów niskoemisyjnych w trybie zasilania LPG i benzyną w teście typu I według dyrektywy 70/220/EWG i regulaminu 83

Table 3. Selected exhaust pollutant test results of low emission vehicles running in LPG or gasoline modes from test type I as per Directive 70/220/EEC and Regulation 83

Generacja LPG / *LPG generation*	Paliwo / *Fuel*	Emisja / *Emission* [g/km]		
		CO	HC	NO_x
I	benzyna / *gasoline*	2,10	0,21	0,14
	LPG	9,50	0,90	0,54
II	benzyna / *gasoline*	3,41	0,23	0,16
	LPG	3,68	0,52	0,42
II	benzyna / *gasoline*	2,80	0,20	0,15
	LPG	16,76	0,74	0,36
III	benzyna / *gasoline*	1,95	0,15	0,10
	LPG	3,18	0,51	0,59
IV	benzyna / *gasoline*	1,95	0,15	0,10
	LPG	3,70	0,40	0,50
IV	benzyna / *gasoline*	0,46	0,04	0,03
	LPG	0,40	0,07	0,10

If T is greater than 1, then the increase in the emission in the LPG fuelling phase as compared to the gasoline fuelling phase is higher than in the LPG fuelling mode. Example: if T equals 3, then Z equals 5. If T is smaller than 1, the situation is reversed.

7. Fuelling system emission

In theory, no vapor emission should take place in the case of LPG fuelled vehicles as the system must be hermetical. Practically, in some vehicles the LPG system is not leakproof. Besides, it is quite common that a small emission of HC takes place when the engine is stopped and the fuel vapor is released through safety valves if critical pressure is exceeded. It is estimated that the fuelling system emission in LPG fuelled vehicles constitutes approx.10–20% of the fuelling system emission in gasoline fuelled vehicles not adapted for the LPG fuelling.

W przypadku zasilania dwupaliwowego, które jest stosowane prawie wyłącznie w Polsce, dodatkowa emisja powstaje w wyniku parowania z układu zasilania benzyną:
– podczas jazdy,
– po zatrzymaniu częściowo lub całkowicie nagrzanego samochodu,
– w wyniku dobowych zmian temperatury otoczenia.

Brak jest zupełnie danych umożliwiających ocenę emisji z układu zasilania podczas jazdy.

Emisja po zatrzymaniu samochodu jest w przypadku zasilania dwupaliwowego mniejsza niż zasilania jednopaliwowego (tylko benzyną). Szczególnie duże zmniejszenie występuje w pojazdach konwencjonalnych wyposażonych w gaźniki.

Na emisję w wyniku dobowych zmian temperatury w pojazdach dwupaliwowych w porównaniu z zasilanymi tylko benzyną wpływają dwa przeciwstawnie oddziaływujące czynniki. Ponieważ tylko rozruch i grzanie silnika następuje przy zasilaniu benzyną, to zużycie tego paliwa jest bardzo małe. Użytkownicy na ogół tankują około 25% pojemności zbiornika benzyny, co wystarcza na wiele tygodni eksploatacji. Powoduje to wzrost parowania ze względu na mniejszą ilość paliwa w zbiorniku. Jednocześnie jednak, ze względu na dłuższy czas przechowywania benzyny w zbiorniku, zmniejsza się zawartość komponentów lekkich, a zatem także prężność par, co przyczynia się do zmniejszenia parowania. Przeciętnie emisja w wyniku dobowych zmian temperatury z pojazdach dwupaliwowych jest większa, niż w zasilanych tylko benzyną (rys. 4).

Uwzględniając wszystkie wymienione czynniki szacuje się, że całkowita emisja z układów zasilania pojazdów dwupaliwowych jest podobna do pojazdów zasilanych wyłącznie benzyną. Należy podkreślić, że emisja z układu zasilania wpływa w niewielkim stopniu na właściwości ekologiczne, gdyż jej udział w całkowitej emisji węglowodorów z pojazdów, szczególnie niskoemisyjnych, jest niewielki. W warunkach klimatycznych Polski szacuje się go na mniej niż 10%.

8. Emisja zanieczyszczeń niekontrolowanych

Analiza emisji zanieczyszczeń niekontrolowanych została przeprowadzona na podstawie informacji uzyskanych z literatury fachowej. Informacje te są niedostateczne do jej kwantyfikacji.

Gaz płynny nie zawiera w ogóle węglowodorów aromatycznych. Powoduje to, że w spalinach zasilanych nim pojazdów zawartość tych związków jest znacznie mniejsza niż przy zasilaniu benzyną (tab. 4).

W tabeli 5 są zestawione wyniki badań emisji związków aroma-

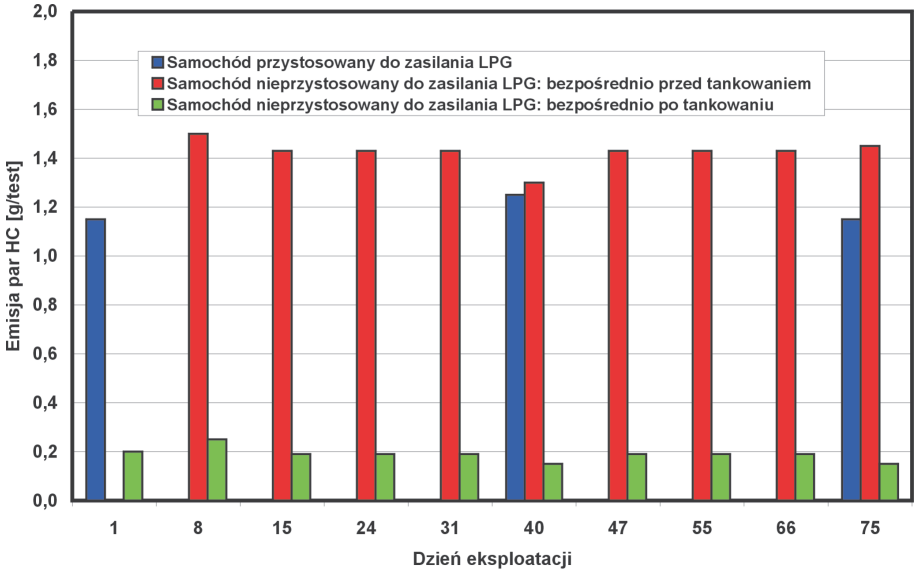
In the case of bi-fuel vehicles, which are used almost exclusively in Poland, additional emission from the gasoline fuelling system occurs:
– in driving conditions,
– after stopping of a partly or fully warmed up engine,
– as a result of daily ambient temperature variations.

There is no data to evaluate the fuelling system emissions in driving conditions.

The emission, after stopping of a vehicle is lower in the case of a bi-fuel vehicle. Particularly sizeable drop in the emission level occurs in conventional vehicles fitted with carburetors.

The emission being a result of daily ambient temperature variations in bi-fuel vehicles as compared to gasoline vehicles is influenced by two opposite factors. Because the start up and warm up phases are the only phases when the engine operates on gasoline the consumption of this fuel is miniscule. The drivers usually refuel their vehicles up to 25% of the tank capacity which is enough for several weeks of operation. This, however causes higher diurnal breathing losses due to a low fuel level in the tank. At the same time, due to a long period of fuel storage in the tank the content of light components decreases as well as the vapor pressure, which reduces evaporation. The average emission due to daily ambient temperature variations in bi-fuel vehicles is higher than in those fuelled by gasoline exclusively (Fig. 4).

Considering all the factors it is estimated that the total emission from the fuelling system from bi-fuel vehicles is similar to that of gasoline vehicles. It should be noted that the emission form the fuelling system has insignificant influence on the ecological properties of a vehicle as its share in the total HC emission from low emission vehicles is not high. In the climatic condition of Poland it is estimated to be less than 10%.



Rys. 4. Porównanie emisji par benzyny [g/test] w wyniku dobowych zmian temperatury z samochodu niskoemisyjnego (Euro 2) przystosowanego i nieprzystosowanego do zasilania LPG

Fig. 4. Comparison of diurnal breathing losses [g/test] from a low emission vehicle (Euro 2) adapted and non-adapted to the LPG fuelling

Tabela 4. Skład spalin [% obj.] przy zasilaniu propanem i benzyną [15]
Table 4. Exhaust gas composition (LPG and gasoline)

Rodzaj węglowodorów / *Type of hydrocarbons*	Paliwo / *Fuel*	
	propan / *propane*	benzyna* / *gasoline**
Parafiny / *Paraffins*	55,9	24,5
Olefiny / *Olefins*	43,7	52,1
Aromaty / *Aromates*	0,4	23,4
* benzyna syntetyczna - indolene / *indolene*		

tycznych z pojazdów konwencjonalnych przy zasilaniu dwoma rodzajami paliw.

Z tabeli 5 wynika, że dla pojazdów konwencjonalnych emisja związków aromatycznych jest 10–50 większa przy zasilaniu benzyną niż przy zasilaniu LPG. Wartości podane w tabeli 5 dla LPG dotyczą jednak zasilania ubogą mieszanką paliwowo-powietrzną ($\lambda > 1{,}05$) i benzyną stosowaną w połowie lat dziewięćdziesiątych, a więc cechującą się dużą zawartością aromatów i benzenu. W przypadku mieszanki bogatszej od stechiometrycznej, co według danych ITS jest typowe dla pojazdów konwencjonalnych w Polsce, wzrasta emisja tych zanieczyszczeń przy zasilaniu LPG. Ponadto obecnie benzyna zawiera znacznie mniej benzenu, co przyczynia się do zmniejszenia jego emisji przy zasilaniu tym paliwem. Szacuje się, że różnice względne przy zasilaniu obu paliwami pojazdów konwencjonalnych znajdujących się w eksploatacji w Polsce są obecnie kilkakrotnie mniejsze niż wynikające z tabeli 5.

W przypadku pojazdów niskoemisyjnych emisja zanieczyszczeń wymienionych w tabeli 5 jest znacznie mniejsza ze względu na utlenianie w reaktorze katalitycznym. W związku z tym maleje różnica jej wartości bezwzględnych przy zasilaniu obu paliwami. Zakładając, że zawartość benzenu w emisji węglowodorów jest w pojazdach niskoemisyjnych podobna do podanej w tabeli 5, i uwzględniając, że:
– zawartość tego związku w benzynach jest obecnie znacznie mniejsza niż była w połowie lat dziewięćdziesiątych,
– jednostkowa emisja drogowa węglowodorów jest wielokrotnie większa przy zasilaniu LPG,
– przebieg samochodów jest większy przy zasilaniu LPG

otrzymuje się, że emisja tego zanieczyszczenia przy zasilaniu benzyną jest obecnie jedynie nieznacznie większa.

Według [14] emisja 1,3-butadienu jest przy zasilaniu LPG mniejsza, natomiast aldehydów przeciętnie nieznacznie większa niż przy pracy na benzynie. Szczególnie duże zwiększenie występuje w przypadku akroleiny i acetalaldehydu.

Pod względem emisji kontrolowanych zanieczyszczeń zasilanie LPG jest korzystniejsze niż benzyną. W przypadku pojazdów niskoemisyjnych korzyści są znacznie mniejsze niż dla pojazdów konwencjonalnych.

8. Non-controlled pollutant emission

The analysis of non-controlled pollutants is performed based on information acquired from the relevant professional literature. The information is insufficient to provide appropriate quantification.

LPG does not contain aromates, the result of which is that their content in the exhaust gases is lower than in the exhaust gases of an engine fuelled by gasoline (Tab. 4).

Table 5 presents the results of tests for aromatic hydrocarbons emissions of conventional bi-fuel vehicles.

As Table 5 shows, the aromatic hydrocarbons emission from conventional vehicles is 10–50 times higher when fuelled by gasoline. The values given in table 5 for LPG refer to a lean air fuel mixture ($\lambda > 1.05$) and gasoline used in mid 90s, thus, characterized by a high content of benzene and aromatic hydrocarbons. In the case of an air fuel mixture richer than stoichiometric, which, according to ITS data, is typical of conventional vehicles in Poland, the emission of these pollutants rises when fuelled by LPG. Besides, today gasoline contains much less benzene, which contributes to a reduction of the emission of this compound. It is estimated that the relative differences, when comparing the two fuels for conventional vehicles currently used in Poland, are several times lower than shown in Table 5.

In the case of low emission vehicles, the emission of pollutants in Table 5 is much lower due to the oxidation process in a catalytic converter. Hence, the difference of its absolute values drops for both fuels. Assuming that the benzene share in the HC emission is similar to that in table 5 for low emission vehicles and considering the following:
– the content of this compound in gasoline is much lower currently than it used to be in mid 90s,
– specific road emission of HC is much higher than in the LPG fuelling,
– vehicle mileage is higher in the LPG fuelling

we can state that the emission of this pollutant in the gasoline fuelling undergoes a slight increase only.

According to [14] the emission of 1,3-butadiene is lower in the LPG fuelling, but the emission of aldehydes is, on average, slightly higher than in the gasoline fuelling. Particularly high increase occurs for acroleine and acetaldehyde.

In terms of controlled pollutants emission, the LPG fuelling is more advantageous than the gasoline fuelling. In the case of low emission vehicles there are much fewer advantages.

Tabela 5. Emisja benzenu i ciężkich węglowodorów aromatycznych w spalinach pojazdów konwencjonalnych przy zasilaniu LPG i benzyną [14]
Table 5. Benzene and polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from conventional vehicles fuelled with LPG and gasoline

Związek aromatyczny / *Aromatic hydrocarbons*	Jednostka / *Unit*	Zasilanie benzyną / *Gasoline fuelling*	Zasilanie LPG / *LPG fuelling*
Benzen / *Benzene*	% HC	6,83	0,63
Benzo(k)fluoranten / *Benzo(k)fluorantene*	µg/km	0,3	0,01
Fluoranten / *Fluorantene*	g/km	18,22	1,36
Benzo(a)piren / *Benzo(a)pirene*	g/km	0,48	0,01

9. Porównanie emisji przy zasilaniu obu paliwami

Wskaźnik emisji dwutlenku węgla pojazdów przy zasilaniu gazem jest mniejszy niż przy zasilaniu benzyną, jednak większy przebieg pojazdów powoduje, że emisja roczna jest nieznacznie większa. W tabeli 6 są zestawione wyniki oszacowania emisji zanieczyszczeń w 1995 i 2004 r.:
– przy zasilaniu LPG,
– przy zasilaniu benzyną, gdyby przystosowane pojazdy pracowały wyłącznie na tym paliwie.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w 1995 r. stosowanie zasilania LPG spowodowało zmniejszenie emisji tlenku węgla i węglowodorów odpowiednio o około 2 i 0,8 Gg, a więc odpowiednio o 8 i 4%. Zmniejszeniu uległa także emisja dwutlenku siarki i ołowiu ze względu na mniejszą zawartości siarki i zerową zawartość ołowiu w płynnym gazie. Zwiększeniu uległa natomiast emisja dwutlenku węgla (o 4%).

W 2004 r. stosowanie zasilania LPG spowodowało wzrost emisji wszystkich kontrolowanych zanieczyszczeń. Szczególnie duży wzrost nastąpił w przypadku tlenku węgla (o prawie 50 Gg, czyli o 54%). W przypadku węglowodorów i tlenków azotu zwiększenie wyniosło odpowiednio 8 i 20%. Podobnie jak w 1995 r., wzrosła emisja dwutlenku węgla (o 4%). Zmniejszeniu uległa emisja dwutlenku siarki i także, co jest oczywiste, ołowiu. Przy obecnym poziomie nie stwarzają one jednak żadnego zagrożenia ekologicznego. Należy podkreślić, że w 2005 r. emisja dwutlenku siarki przy zasilaniu obu paliwami była praktycznie jednakowa, co wynikło z kolejnego zmniejszenia jej zawartości w benzynie (tab. 2). Na rysunku 5 przestawiono zmianę emisji niektórych

9. Comparison of emissions for both LPG and the gasoline fuelling

The emission of CO_2 from vehicles run on LPG is lower than those run on gasoline but the annual mileage of the LPG fuelled vehicles leads to a slight rise in the annual of CO_2 emission (table 6).

In table 6 the estimate results of 1995 and 2004 emissions have been given:
– while fuelled by LPG,
– while fuelled by gasoline, if the adapted vehicles were to operate on this fuel exclusively.

The performed analysis shows that in 1995 the application of the LPG fuelling reduced the emission of CO and HC by approximately 2 and 0.8 Gg, i.e. 8 and 4% respectively. The emissions of SO_2 and Pb were reduced as well due to a lower sulphur and zero lead content in LPG. The emission of CO_2 on the other hand increased (by 4%).

In 2004 the application of the LPG fuelling led to an increase in the emission of all controlled pollutants, particularly CO (by nearly 50 Gg, i.e. 54%). In the case of HC and nitrogen oxides the increase amounted to 8 and 20% respectively. Similarly to 1995 the emission of CO_2 increased by 4%. The emission of SO_2 and obviously Pb was reduced. At the current level they do not pose any ecological threat. It is to be noted that in 2005 the emission of SO_2 in both LPG and the gasoline fuelling was practically identical, which resulted from yet another reduction of S content in gasoline (Tab. 2).

Figure 5 presents the change in the emission of some of the pollutants resulting from the LPG application.

Tabela 6. Emisja zanieczyszczeń z pojazdów przy zasilaniu LPG i hipotetyczna emisja przy zasilaniu benzyną w 1995 i 2004 r.

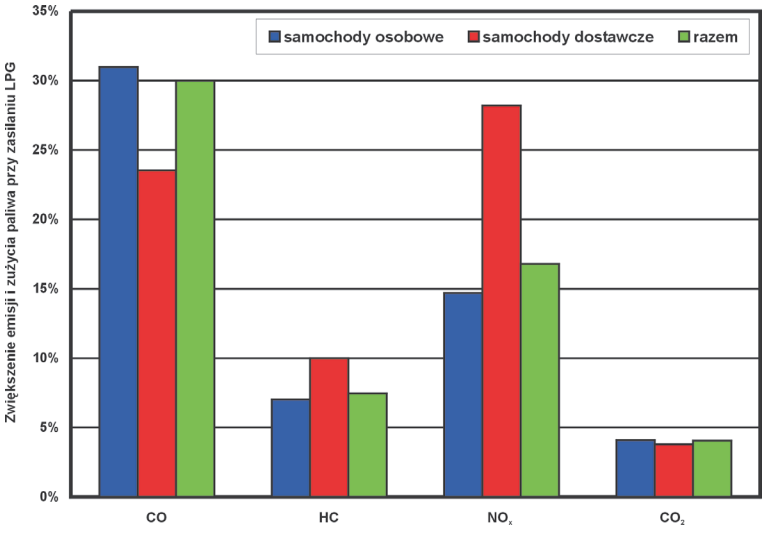
Table 6. Pollutant emissions from LPG fuelled vehicles and hypothetical emissions if those vehicles were fuelled with gasoline in 1995 and 2004

Rok / *Year*	Kategoria / *Category*	Zużycie paliwa / *Fuel consumption* [Gg]		Emisja zanieczyszczeń przy zasilaniu LPG / *Pollutant emission in the LPG fuelling* [Gg]						Hipotetyczna emisja zanieczyszczeń przy zasilaniu / *Hypothetical emission in the gasoline fuelling* [Gg]					
		LPG	BS	CO	HC	NO_x	CO_2	SO_2	Pb	CO	HC	NO_x	CO_2	SO_2	Pb
1995	M1.α	140	126	24	4,2	4,5	418	0,01	0	25	4,8	4,4	397	0,16	0,012
	N1.α	13	12	2	0,4	0,4	39	0	0	3	0,5	0,4	41	0,02	0,001
	M1.α + N1.α	153	138	26	4,6	4,9	457	0,01	0	28	5,3	4,8	438	0,18	0,013
2004	M1.α	268	243	32	6,7	10,2	801	0,02	0	46	8,7	8,7	771	0,07	0,001
	M1.γ	895	813	81	4,7	10,9	2672	0,06	0	32	1,9	9,3	2560	0,24	0,004
	M1.α + M1.γ	1163	1056	113	11,4	21,1	3473	0,08	0	78	10,6	18	3331	0,31	0,005
	N1.α	45	41	5	1,1	1,7	135	0,00	0	8	1,3	1,3	130	0,01	0
	N1.γ	132	120	12	0,9	2,2	393	0,01	0	5	0,5	1,5	378	0,04	0,001
	N1.α + N1.γ	177	161	17	2,0	3,9	528	0,01	0	13	1,8	2,8	508	0,05	0,001
	M1.α + M1.γ + + N1.α + N1.γ	1340	1217	130	13,4	25	4001	0,09	0	91	12,4	20,8	3839	0,36	0,006

LPG – gaz płynny propan-butan, BS – benzyna silnikowa, M1.α – samochody osobowe konwencjonalne, M1.γ – samochody osobowe niskoemisyjne, N1.α – samochody o masie maksymalnej nie przekraczającej 3500 kg inne niż osobowe, konwencjonalne, N1.γ – samochody o masie maksymalnej nie przekraczającej 3500 kg inne niż osobowe, niskoemisyjne / *LPG – Liquefied petroleum gas, M1.α – conventional passenger vehicles, M1.γ – low emission passenger vehicles, N1.α – vehicles of GVW not exceeding 3500 kg other than passenger, conventional, N1.γ – vehicles of GVW not exceeding 3500 kg other than passenger, low emission*

zanieczyszczeń wynikająca ze stosowania LPG.

Należy podkreślić, że oszacowanie efektów ekologicznych stosowania LPG do zasilania pojazdów w 2004 r. przeprowadzono przy założeniach korzystnych dla tego paliwa. Dotyczy to wartości liczbowych takich czynników, jak wzrost przebiegu rocznego, droga przebyta po zimnym rozruchu przy zasilaniu benzyną podczas pracy w trybie zasilania LPG, dobowa liczba rozruchów zimnego silnika. Do obliczeń przyjęto także wskaźniki emisji kontrolowanych zanieczyszczeń stosowane do corocznej inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego prowadzonej przez ITS. Opracowano je na podstawie badań i analiz prowadzonych w poprzednich latach. Najnowsze, nie zakończone jeszcze kompleksowe badania wskazują, że wskaźniki te dla pojazdów zasilanych LPG, w szczególności niskoemisyjnych, znajdujących się aktualnie w eksploatacji są znacznie większe. W związku z tym, wzrost emisji kontrolowanych zanieczyszczeń w wyniku stosowania LPG wynosi co najmniej tyle, ile wartości podane na rys. 5.



Rys. 5. Wzrost emisji wybranych zanieczyszczeń w 2004 r. wynikający ze stosowania LPG

Fig. 5. Emission increase of selected pollutants in 2004 due to LPG fuelling

10. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazuje, że LPG ma pewne właściwości korzystnie wpływające na emisję zanieczyszczeń z pojazdów. Właściwości paliwa nie można jednak oceniać w oderwaniu od sposobu jego spalania, które zależy w znacznym stopniu od stosowanego układu zasilania. Zła jakość stosowanych instalacji przystosowujących do zasilania gazem i zła jakość ich montażu powodują, że jego korzystne właściwości nie są w Polsce wykorzystywane.

W 1995 r., gdy do zasilania LPG były przystosowywane prawie wyłącznie samochody konwencjonalne, stosowanie tego paliwa miało charakter proekologiczny. Przynosiło ono korzyści w postaci zmniejszenia emisji: tlenku węgla, węglowodorów, dwutlenku siarki, ołowiu oraz części zanieczyszczeń niekontrolowanych, w szczególności benzenu i ciężkich węglowodorów aromatycznych. Korzyści te nie były jednak większe niż wynikające z wprowadzenia benzyny bezołowiowej zamiast etylizowanej. Zachęty do stosowania LPG w postaci ulg w podatku akcyzowym były natomiast nieporównanie większe niż w przypadku benzyny bezołowiowej.

Z upływem czasu korzyści ekologiczne w wyniku stosowania LPG ulegały stopniowemu zmniejszeniu z następujących względów:

– poprawie ulegały właściwości benzyn,
– wzrastał udział pojazdów niskoemisyjnych w parku pojazdów przystosowanych.

Po 2001 r. stosowanie gazu zaczęło przynosić straty ekologiczne.

W 2004 r. zanieczyszczenie środowiska przez pojazdy zasilane LPG było większe niż byłoby w przypadku, gdyby do zasilania została stosowana benzyna. Wzrostowi uległa emisja wszystkich kontrolowanych zanieczyszczeń oraz gazów cieplarnianych. Jednocześnie zalety zasilania LPG: mała emisja dwutlenku siarki i związków aromatycznych oraz

It is to be noted that the estimation of the ecological effects of the LPG application in vehicles in 2004 was performed going on the advantageous assumptions for this fuel. This pertains to the values of such factors as the increase in the annual mileage, distance covered after cold start on gasoline in the LPG fuelling mode and daily number of cold starts. For those calculations, the factors for controlled pollutants emission were also assumed, regularly used for the annual inventory of pollutant emission from road transportation as applied by ITS. These were prepared based on the research and analyses performed in the previous years. The latest, not yet completed, investigations have shown that these factors for the LPG fuelled vehicles, particularly those of low emission currently in use, are much higher. Hence, the increase in the level of controlled pollutants as a result of the LPG application is at least as high as the values given in Fig. 5.

10. Conclusions

The performed analysis disclosed certain advantageous properties of the LPG application in terms of emissions. The properties of fuels cannot however be evaluated separately from the way it is combusted i.e. from the fuelling system. The low quality of LPG systems as well as the low quality of its fitting do not allow the ecological benefits of LPG to be fully taken advantage of.

In 1995, when almost all vehicles adapted for the LPG fuelling were the conventional ones the application of this type of fuel was pro-ecological. the LPG application reduced: CO, HC, SO_2, Pb and some of the non-controlled pollutants, benzene and aromatic hydrocarbons in particular. However, the advantages were not any greater than those resulting from the introduction of unleaded gasoline.in place of leaded one. The incentives to apply LPG such as excise tax relief were much higher than in the case of unleaded gasoline.

As time went, the benefits resulting from the LPG application diminished for the following reasons:

– gasoline properties improved,
– the share of low emission vehicles grew in the total fleet of adapted vehicles.

zerowa – ołowiu, utraciły w dużym stopniu swoje znaczenie. Sytuacja ulega szybkiemu, dalszemu pogorszeniu, gdyż obecnie do zasilania gazem są przystosowywane przede wszystkim pojazdy niskoemisyjne, a przeważająca ich część (tab. 2) jest wyposażana w instalacje pierwszej i drugiej generacji. Wprowadzenie zachęt do stosowania LPG przynosi więc obecnie straty ekologiczne zamiast oczekiwanych korzyści. Z punktu widzenia ochrony środowiska udzielanie ulg w podatku akcyzowym na to paliwo jest nieuzasadnione. Wręcz przeciwnie, należałoby podjąć działania zniechęcające użytkowników do przystosowywania pojazdów niskoemisyjnych do zasilania tym paliwem. Należy podkreślić, że nawet, gdyby do adaptacji były stosowane wyłącznie instalacje najnowszych generacji, to korzyści ekologiczne osiągnięte w wyniku stosowania LPG w pojazdach samochodowych też by nie wystąpiły.

Skróty i oznaczenia / *Abbreviations and Nomenclature*

LPG ciekły gaz paliwowy (propan-butan) / *Liquefied Petroleum Gas*

ITS Instytut Transportu Samochodowego / *Motor Transport Institute*

After 2001 the application of LPG began to generate "ecological losses".

In 2004 the environment pollution by vehicles running on LPG was greater than if gasoline had been used. The emission of all the controlled pollutants and greenhouse gases grew and the advantages of LPG over gasoline: low SO_2, PAH and zero Pb emission lost their significance. The situation gets worse and worse as, currently, it is mostly the low emission vehicles that are adapted to the LPG fuelling and the majority of those (Tab. 2) is fitted with generation I and II LPG systems. The introduction of incentives to use LPG systems currently generates more ecological losses than gains. From the ecological point of view, there are no grounds for any excise tax reliefs granted for the use of LPG. Quite the other way around, actions should be taken to deter the drivers from adapting low emission vehicles to the LPG fuelling. It should be emphasized that even if the adaptation involved the latest generation systems, the ecological benefits would not occur either.

Artykuł recenzowany

Literatura/*Bibliography*

[1] Prace ITS dotyczące inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu w latach 1995–2004.

[2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 16 sierpnia 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań jakościowych dla paliw ciekłych (DzU, nr 192, poz. 1969).

[3] Bernhardt M.: Emisja przez silniki spalinowe gazów powodujących efekt cieplarniany. Materiały na Seminarium „Transport a ochrona środowiska", Biuro Studiów i Ekspertyz Kancelarii Sejmu, wrzesień 1994.

[4] Monitoring of ACEA's Commitment on CO_2 Emission Reduction from Passenger Cars (2000). Final Report, Joint Report of the European Automobile Manufactures Association and the Commission Services, 28 June 2001.

[5] PN-EN 589:2004 Paliwa do pojazdów samochodowych – LPG. Wymagania i badania.

[6] World-wide Fuel Charter. December 2002.

[7] Radzimirski S.: Ocena możliwości redukcji gazów cieplarnianych z transportu samochodowego poprzez działania techniczne. Opracowanie wewn. ITS nr 7206.

[8] Gola M., Kowalewicz A., Luft S., Michalczewski A., Różycki A.: Wybrane aspekty zasilania silników o ZI metodą wtrysku butanu do kolektora dolotowego. Silniki Gazowe, Częstochowa 2000.

[9] Majerczyk A., Taubert S.: Układy zasilania gazem propan-butan. Warszawa, WKiŁ 2003.

[10] Merkisz J., Kozak M.: Możliwości spełnienia nowych norm toksyczności spalin przez silniki spalinowe zasilane paliwami gazowymi i konwencjonalnym. Silniki Gazowe 2000, Częstochowa 2000.

[11] AEGPL Strategy Paper: LPG Heavy Duty Vehicles. Association Europeenne des Gaz de Petrole Liquefies, 1998.

[12] MEET – Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, European Commission, Transport research, Fourth Framework Programme, Strategic research, DG 1999.

[13] Radzimirski S., Taubert S., Majerczyk A., Żółtowski A.: Kierunki działań w odniesieniu do paliw silnikowych dla redukcji emisji zanieczyszczeń ze środków transportu drogowego w Polsce w perspektywie średniookresowej. Opracowanie wewn. ITS nr 7005.

[14] Economic Commission for Europe: Air Pollution Studies No. 15, Guidelines for Estimating and Reporting Emission Data under the Convention on Long-range Transboudary Air Pollution. United Nations, New York and Geneva 2003.

[15] Patterson D.J., Henein N.A.: Emissions from Combustion Engines and Their Control. Ann Arbor Science Publishers Inc 1972.

[16] Radzimirski S., Majerczyk A., Taubert S.: Określenie emisji zanieczyszczeń z niskoemisyjnych silników spalinowych pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Badania laboratoryjne emisji zanieczyszczeń z układu zasilania paliwem. Opracowanie wewn. ITS nr 9.0816.3 (projekt badawczy KBN).

[17] Majerczyk A., Taubert S.: Analiza porównawcza parametrów pracy, w szczególności właściwości ekologicznych, samochodów zasilanych LPG wyposażonych w I–IV generację układów zasilania LPG. Opracowanie wewn. ITS nr 6420/ZOŚ.

* Doc. dr inż. Stanisław Radzimirski – Kierownik Zakładu Ochrony Środowiska w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie.

Mr Stanisław Radzimirski, Associate Professor, PhD, MEng – Head of Environment Protection Department of Motor Transport Institute, Warsaw, Poland.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz – Profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Prof. Jerzy Merkisz DSc, MEng – Professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.