

## WYBRANE ASPEKTY ANALIZY SKŁADU SPALIN AUTOBUSÓW ZASILANYCH CNG

W artykule przedstawiono wyniki analiz składu spalin autobusów komunikacji miejskiej, przystosowanych do zasilania gazem ziemnym CNG. W skład grupy badawczej weszły trzy marki autobusów: Jelcz 120M, Solaris Urbino 12 i MAN Lion's City A21. Wyniki pomiarów emisji CO<sub>2</sub> poddano weryfikacji obliczeniowej, co pozwoliło na pogłębioną analizę własności ekologicznych i eksploatacyjnych badanych autobusów. W części wstępnej pracy przedstawiono aktualną charakterystykę stosowania napędów CNG w autobusowej komunikacji miejskiej w Polsce.

### WSTĘP

Wśród autobusów używanych w komunikacji miejskiej w Polsce, autobusy zasilane gazem ziemnym stanowią wyspecjalizowaną, niewielką grupę, której udział wynosi ok.4%. Zasilanie gazem ziemnym może być realizowane w systemach CNG (Compressed Natural Gas) lub LNG (Liquefied Natural Gas). Od ponad 10 lat następuje w Polsce systematyczny wzrost liczby tych pojazdów. W roku 2006 przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej eksploatowały ok. 80 autobusów gazowych, w roku 2008 ok.250, w roku 2012 ok.330, a aktualnie jest to ok.500 autobusów [7]. Autobusy gazowe użytkuje się w 20 polskich miastach. Najwięcej autobusów gazowych eksploatowanych jest w takich ośrodkach miejskich jak: Rzeszów, Radom, Tychy, Tarnów, Zamość, Przemyśl, Gdynia (autobusy CNG) oraz Olsztyn i Warszawa (autobusy LNG). W wymienionych miastach łącznie znajduje się ponad 50% polskich autobusów gazowych. Na szczególną uwagę zasługuje wprowadzenie do eksploatacji po raz pierwszy w Polsce, najpierw w Olsztynie [8] (październik 2013) 12 autobusów Solbus LNG, a następnie w Warszawie [9] (styczeń 2015) 35 autobusów Solbus LNG.

Gaz ziemny jako paliwo silnikowe, w stosunku do innych paliw, charakteryzuje się m.in. następującymi zaletami:

- bardzo dobrze miesza się z powietrzem, tworząc jednorodną, homogeniczną mieszaninę palną,
  - nie zmywa filmu olejowego ze ścianek tulei cylindrowej,
  - zachowuje stałe w czasie parametry fizyczno-chemiczne paliwa.
- Przedstawiona w tabeli 1 analiza parametrów energetycznych,

dotyczy metanu CH<sub>4</sub> jako głównego składnika gazu ziemnego.

Analiza parametrów przedstawionych w tabeli 1 potwierdza bardzo dobre własności gazu ziemnego jako paliwa silnikowego. Szczególnie korzystna jest wysoka liczba oktanowa, umożliwiająca bezstukowe spalanie w silnikach o wyższych niż w przypadku benzyny stopniach sprężania. Na uwagę zasługuje większe niż dla benzyny zapotrzebowanie powietrza do spalania, co zmniejsza wartość opałową mieszaniny stechiometrycznej i w efekcie prowadzi do ok. 10% obniżenia mocy silników po wprowadzeniu zasilania gazowego. Metodą kompensującą tę stratę może być podwyższenie stopnia sprężania lub zwiększenie stopnia doładowania silnika.

O bardzo dobrych własnościach ekologicznych gazu ziemnego świadczy skład spalin jakie powstaną podczas spalania stechiometrycznego, przedstawiony w tabeli 2. Zwraca uwagę znacznie wyższa niż w przypadku benzyny zawartość wody w spalinach oraz mniejszy udział dwutlenku węgla, co czyni je mniej szkodliwymi dla środowiska naturalnego. Udział wody w spalinach jest tym większy, im wyższą wartość osiąga wskaźnik wyrażony proporcją liczby atomów wodoru do węgla w cząsteczce paliwa węglowodorowego. Wskaźnik ten jest najkorzystniejszy dla metanu i wynosi 4, dla propanu - 2,67, dla butanu - 2,5, a dla benzyny - 1,7.

Atrakcyjność gazu ziemnego jako paliwa silnikowego określają następujące jego cechy:

- niska emisja tlenu węgla ze względu na mniejszy udział atomów węgla w cząsteczce paliwa,
- mniejsza emisja niespalonych węglowodorów, w szczególności rakotwórczych, z uwagi na prostą budowę cząsteczki paliwa i bardziej homogeniczną mieszaninę palną,

Tab. 1. Wybrane parametry metanu CH<sub>4</sub> na tle innych paliw silnikowych [3]

Parametr	Metan	LPG 50/50	Benzyna	Wodór
Wartość opałowa [MJ/kg]	50,06	46,09	43	120
Wartość opałowa [MJ/m <sup>3</sup> ]	35,9	103,7	30960-32250	10,78
Zapotrzebowanie powietrza [kg/kg pal.]	17,26	15,6	14,37	34,6
Wartość opałowa mieszaniny stechiometrycznej [kJ/dm <sup>3</sup> ]	3,40	3,70	3,79	3,17
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ] (przy 1013hPa i 0°C)	0,7172	2,25	720-750	0,0898
Liczba oktanowa	130	105	95-98	70
Temperatura zapłonu [°C]	650	420	220-400	560
Temperatura wrzenia [°C] (przy 1013hPa)	-161,15	-30	35-215	-253
Granice zapalności [% obj.gazu w powietrzu]	5-15	1,8-9	1,16-7	4-77
Granice zapalności mieszaniny - λ	0,7-2,1	0,4-2	0,3-1,8	0,5-10,5
Prędkość czoła płomienia [m/s]	0,34	0,83	0,3-0,6	2,7

- prawie 100% redukcja rakotwórczych cząstek stałych oraz eliminacja efektu zadymienia,
- obniżenie emisji tlenków azotu, z uwagi na niższą temperaturę w czasie spalania mieszaniny palnej o niższej od benzyny i LPG wartości opałowej,
- obniżenie poziomu hałasu silnika, szczególnie adaptowanych do zasilania CNG silników wysokoprężnych.

Podstawą kalkulacji efektywności stosowania gazu ziemnego do napędu pojazdów, jest różnica cen CNG i ekwiwalentnej energetycznie ilości porównywanego paliwa. W przypadku porównania zużycia benzyny i CNG, należy uwzględnić ok. 10% wyższe zużycie gazu wyrażone w m<sup>3</sup>, w odniesieniu do zużycia benzyny wyrażonego w dm<sup>3</sup>. Różnica ta wynika z niższej sprawności ogólnej silnika po adaptacji do zasilania gazowego, przy założeniu, że nie wprowadzono zmian konstrukcyjnych zwiększających sprawność. Ekwiwalentną do ceny 1 dm<sup>3</sup> benzyny, będzie więc cena 1m<sup>3</sup> CNG pomnożona przez współczynnik 1,1. Doświadczenia eksploatacyjne dowodzą niższych kosztów paliwa przy zasilaniu gazem ziemnym w odniesieniu do benzyny. Niestety, wprowadzenie w ostatnich latach wysokiej akcyzy na paliwo gazowe CNG, a także bardzo wysokie ceny autobusów gazowych spełniających normy Euro 6, utrudniają dalszy rozwój tego rodzaju komunikacji miejskiej [10].

### 1. BADANIA SKŁADU SPALIN

Badania składu spalin wykonano dla grupy 22 autobusów komunikacji miejskiej, w skład której weszły trzy rodzaje pojazdów: 9 autobusów Jelcz 120M CNG, 3 autobusy Solaris Urbino 12 CNG i 10 autobusów MAN Lion's City A21 CNG.

Autobusy Jelcz 120M CNG wyprodukowane w 1997 roku, są najstarszymi pojazdami w grupie badawczej. Początkowo eksploatowane były one na oleju napędowym, uzyskując przebiegi ponad 500 tys. km, a w 2006 roku ich silniki zostały zmodyfikowane konstrukcyjnie i przystosowane do zasilania gazowego, spełniając obowiązującą wówczas normę czystości spalin – Euro 4. Średni przebieg tych autobusów w trakcie badań wyniósł 877 tys. km.



Rys.1. Autobus Jelcz 120M CNG [6]

Autobusy Solaris Urbino 12 CNG wyprodukowane w 2006 roku, są pojazdami niskopodłogowymi, ze zbiornikami CNG umieszczonymi na dachu. Ich średni przebieg w trakcie badań wyniósł 425 tys. km. Spełniają normę emisji spalin Euro 4.



Rys.2. Autobus Solaris Urbino 12 CNG [6]

Autobusy MAN Lion's City A21 CNG stanowią najmłodszą grupę pojazdów badanych. Wyprodukowane zostały w latach 2011-12, w wersji niskopodłogowej z butlami na dachu. Ich średni przebieg w trakcie badań wyniósł 92 tys. km. Spełniają normę emisji spalin Euro 5.

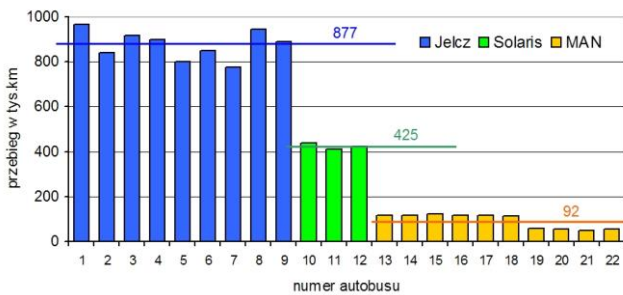


Rys.3. Autobus MAN Lion's City A21 CNG [6]

Przedstawione na rysunku 4 porównanie przebiegów badanych pojazdów, odzwierciedla ich znacznie zróżnicowane zużycie eksploatacyjne, a także różne zaawansowanie rozwiązań konstrukcyjnych dla każdej z 3 podgrup badanych pojazdów. Taki dobór podgrup badawczych powinien wykazać znaczne różnice badanych parametrów spalin, ułatwiające ich późniejszą interpretację. Autobusy Jelcz należy ocenić jako wyeksploatowane w znacznym stopniu, w przeciwieństwie do MAN, które są w początkowej fazie zużycia eksploatacyjnego i przez to mogą stanowić grupę kontrolną do porównania z innymi wynikami. Autobusy Solaris pod względem przebiegu (zużycia), sytuują się prawie w połowie pomiędzy pozostałymi autobusami (Jelcz i MAN).

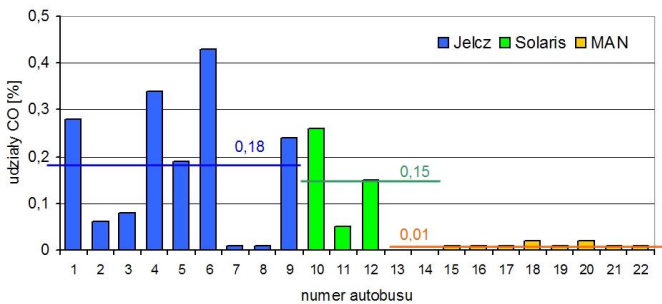
Tab. 2. Teoretyczny skład spalin stechiometrycznych wybranych paliw silnikowych (v/v) [3]

Składnik spalin	Metan	LPG 50/50	Benzyna	Wodór
Azot [N <sub>2</sub> ]	70,6 %	72,1 %	73,4 %	64,5 %
Woda [H <sub>2</sub> O]	19,0 %	15,2 %	11,9 %	34,7 %
Dwutlenek węgla [CO <sub>2</sub> ]	9,5 %	11,8 %	13,8 %	-----
Pozostałe	0,9 %	0,9 %	0,9 %	0,8 %



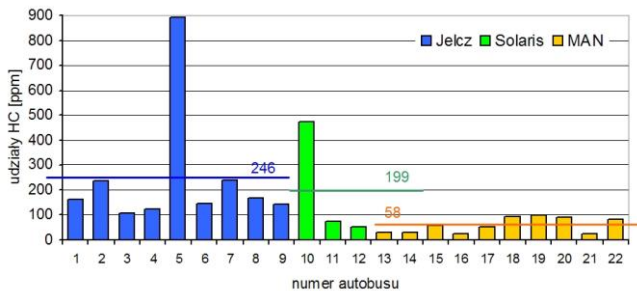
**Rys.4.** Przebiegi badanych autobusów CNG

Badania składu spalin wykonano analizatorem Pierburg Hermann HGA 400, który pozwala na pomiar udziału objętościowego w spalinach: tlenku węgla, dwutlenku węgla, węglowodorów niespalonych, tlenków azotu, tlenu, a także współczynnika nadmiaru powietrza. Urządzenie pozwala na uwzględnienie rodzaju paliwa, którym zasilany jest silnik, a prawidłowy jego wybór (w tym wypadku metan) warunkuje właściwy odczyt udziału węglowodorów niespalonych w spalinach.



**Rys.5.** Udziały tlenku węgla (CO) w spalinach badanych autobusów CNG, zmierzone przy prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min

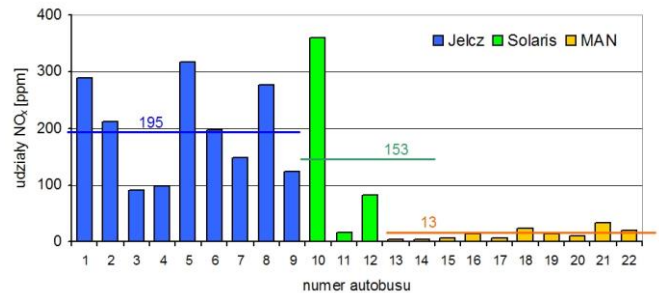
Poziom tlenku węgla w spalinach badanych autobusów osiąga stosunkowo niskie wartości, co można uznać za pozytywną właściwość silników CNG, ale także jest wynikiem działania układów oczyszczania spalin w układach wylotowych przedmiotowych pojazdów. Rysunek 5 ilustruje wielokrotną przewagę nowoczesnych napędów MAN, nad pozostałymi autobusami. Emisja tlenku węgla autobusów Jelcz jest średnio 18-krotnie wyższa, a Solarisów 15-krotnie wyższa niż autobusów MAN. Mimo, iż w pojedynczych przypadkach (autobusy nr 4, 6 i 10) udziały CO przekraczają nieznacznie wartości dopuszczalne (określone w normach diagnostycznych jako 0,3% dla pojazdów rejestrowanych po raz pierwszy po 30.06.1995r. i 0,2% po 30.04.2004r.), wszystkie średnie wartości udziałów CO mieszczą się w adekwatnych normach.



**Rys.6.** Udziały węglowodorów niespalonych (HC) w spalinach badanych autobusów CNG, zmierzone przy prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min

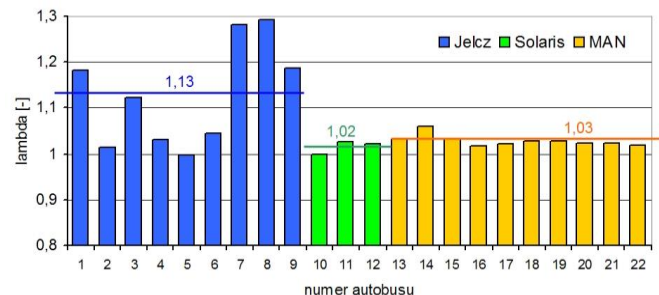
Udziały węglowodorów niespalonych dla autobusów Jelcz osiągają średnio 246 [ppm], dla autobusów Solaris 199 [ppm], a dla

autobusów MAN 58 [ppm], co stanowi niecałe 25% emisji Jelczy. Normatywną wartość odniesienia może tu stanowić poziom 100 [ppm], obowiązujący dla pojazdów rejestrowanych po raz pierwszy po 30.06.1995r. Dla wszystkich autobusów Jelcz norma ta nie jest spełniona, podobnie jak dla autobusu Solaris nr 10. Pozostałe autobusy Solaris i wszystkie MAN nie przekraczają tej wartości dopuszczalnej mimo, iż od 01.05.2004r. udział węglowodorów w spalinach nie jest normowany w przepisach diagnostycznych. Daje się zauważyć dodatnią korelację wartości CO i HC w poszczególnych grupach pojazdów. Potwierdza to wnioski o wysokiej dodatniej korelacji udziałów tlenku węgla i węglowodorów w spalinach, będące wynikiem analiz statystycznych przedstawionych w pracach [4] i [5].



**Rys.7.** Udziały tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w spalinach badanych autobusów CNG, zmierzone przy prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min

Emisja tlenków azotu, w warunkach pracy bez obciążenia, na tzw. biegu luzem, jest wielokrotnie niższa niż podczas pracy ze znacznym obciążeniem silnika. Udziały NO<sub>x</sub> w spalinach, przed katalizatorem, mogą wówczas osiągać wartości rzędu 6000 [ppm]. Wobec tego, przepisy diagnostyczne nie normują tego parametru przy pracy bez obciążenia, gdyż osiąga on wtedy wartości bardzo niskie, niemiarodajne dla oceny własności silnika. Wyniki pomiarów NO<sub>x</sub> (rysunek 7) potwierdzają te rozważania. Średni udział tlenków azotu dla Jelczy wynosi 195 [ppm], a dla MAN jest aż 15 razy niższy i wynosi zaledwie 13 [ppm]. Jeden z autobusów Solaris (nr 10) wyróżnia ponadprzeciętnie wysoka emisja NO<sub>x</sub>, co może być spowodowane dużym zużyciem układu oczyszczania spalin. Potwierdza to również znacznie wyższa emisja węglowodorów i tlenku węgla dla tego autobusu.



**Rys.8.** Współczynnik nadmiaru powietrza λ badanych autobusów CNG dla prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min

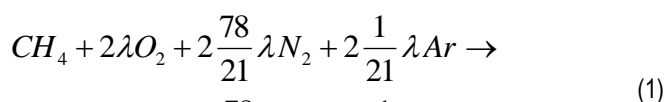
Współczynnik nadmiaru powietrza silników o ZI, w układach sterowania z elektroniczną regulacją składu mieszanki paliwowo-powietrznej, powinien przyjmować wartości bardzo bliskie składowi stechiometrycznemu ( $\lambda = 1,0$ ). Warunek ten bardzo dobrze spełniają autobusy Solaris i MAN (średnio odpowiednio  $\lambda=1,02$  i  $\lambda=1,03$ ). W grupie autobusów Jelcz, skład mieszanki paliwowo-powietrznej zmienia się w dużo szerszych granicach, (średni  $\lambda=1,13$ ) co jest wynikiem znacznego stopnia zużycia eksploatacyjnego zarówno pojazdów, ich silników, jak i elementów układów sterowania, zasilania

nia i oczyszczania spalin. Prowadzi to do znacznych udziałów składników szkodliwych w spalinach, co zostało zilustrowane na rysunkach 5-7.

Przedstawione powyżej wyniki i rozważania stanowią jedynie część, ale najbardziej reprezentatywną, całości badań, które umożliwiają końcowe wnioskowanie i podsumowanie.

## 2. WERYFIKACJA OBLICZENIOWA

Jednym z głównych powodów stosowania napędów gazowych w transporcie samochodowym, jest niższa, w odniesieniu do klasycznego zasilania paliwami płynnymi, emisja dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>. Z rozważań teoretycznych wynika, iż w spalinach silnika CNG, zasilanego metanem, przy λ=1,0 udział objętościowy dwutlenku węgla powinien wynosić około 9,5% (w tych samych warunkach dla benzyny jest to ok. 14%). W przeprowadzonych badaniach, szczególną uwagę zwrócono właśnie na pomiary emisji dwutlenku węgla, a otrzymane wyniki zilustrowano rysunkami 9 i 10. Zmierzone udziały CO<sub>2</sub> wykazują dużą zmienność dla poszczególnych autobusów i mieszczą się w granicach od 7% do ponad 11%. Najniższe wartości dotyczą większości autobusów Jelcz, natomiast najwyższe - MAN. Dla przeprowadzenia dokładniejszej analizy i ustalenia przyczyn tych różnic, wyznaczono dla każdego autobusu teoretyczną, obliczeniową wartość udziału objętościowego CO<sub>2</sub>, w oparciu o równanie reakcji spalania metanu (1) i równanie udziału objętościowego dwutlenku węgla (2), przyjmując wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ, zmierzona podczas badań dla konkretnego autobusu.

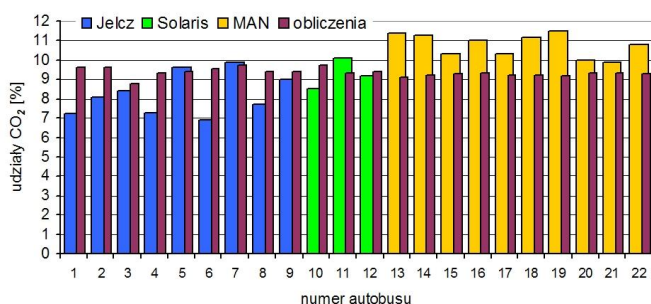


$$CO_2 + 2H_2O + 2\frac{78}{21}\lambda N_2 + 2\frac{1}{21}\lambda Ar + 2(\lambda - 1)O_2$$

$$[CO_2]_o = \frac{1}{1 + 2 + 7,52 + 2 \cdot (\lambda - 1)} \quad (2)$$

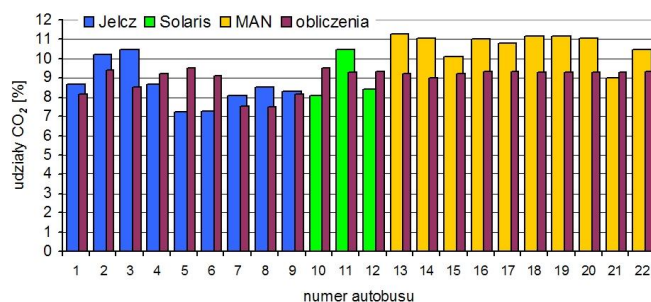
Zakres zmienności tak wyznaczonych udziałów dwutlenku węgla, zmniejszył się do przedziału od 8% do 10%.

W większości przypadków, zmierzony udział CO<sub>2</sub> w spalinach jest wyższy od wyznaczonego teoretycznie. Przyczyny tego należy upatrywać w tym, iż obliczenia były prowadzone dla 100% metanu jako paliwa, natomiast w eksploatacji mamy do czynienia z gazem ziemnym, w którym co prawda metan stanowi 90-98%, ale resztę stanowią inne węglowodory, o większej niż metan zawartości węgla, jak: etan, propan czy butan. Taką relację wyników na wykresach (rysunek 9, 10) należy uznać za właściwą.



**Rys.9.** Zmierzone i obliczone udziały dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) w spalinach badanych autobusów CNG przy prędkości obrotowej biegu jałowego.

Dla niektórych autobusów, zmierzony udział CO<sub>2</sub> w spalinach jest niższy od wyznaczonego teoretycznie. Dotyczy to głównie autobusów Jelcz, które są w znacznym stopniu wyeksploatowane. Wykazują one szereg nieprawidłowości, w tym m.in. nieszczelności w układach wylotowych spalin. W metodologii wykonywania pomiarów składu spalin, wymaga się pełnej szczelności tego układu, gdyż znany jest proces rozrzedzenia spalin przez powietrze z zewnątrz, co powoduje zniekształcenie wyników pomiarów. Prowadzi to do zmniejszenia odczytanych w tych warunkach udziałów poszczególnych składników, w tym również zaniżenie udziału CO<sub>2</sub>. Inną przyczyną jest wysoki poziom tlenu węgla i węglowodorów w spalinach, co także powoduje zmniejszenie udziału CO<sub>2</sub>.



**Rys.10.** Zmierzone i obliczone udziały dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) w spalinach badanych autobusów CNG przy prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min

## PODSUMOWANIE

Wykonane badania i analizy składu spalin trzech grup autobusów CNG, dostarczyły istotnych spostrzeżeń i wniosków. Poszczególne grupy pojazdów charakteryzowały się silnie zróżnicowanymi parametrami eksploatacyjnymi (np. przebieg autobusu), co pozwoliło uzyskać znaczne różnice badanych parametrów, ułatwiające analizowanie i wnioskowanie.

Sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Najwyższe udziały szkodliwych składników spalin charakteryzowały autobusy marki Jelcz, co jest pochodną ich znacznego zużycia eksploatacyjnego oraz mniej zaawansowanych technologicznie układów wpływających na składniki spalin. Dodatkowo zaobserwowano dużą zmienność parametrów charakteryzujących spaliny poszczególnych pojazdów tej marki. Dla tych autobusów średni poziom tlenu węgla w spalinach wyniósł 0,18 %, węglowodorów 246 ppm, a tlenu azotu 195 ppm. Są to wartości wielokrotnie przewyższające wyniki uzyskane dla najlepiej prezentujących się w tych badaniach autobusów MAN (odpowiednio 0,01%, 58 ppm i 13 ppm). Kilka autobusów Jelcz nie spełniało adekwatnych norm diagnostycznych w zakresie udziałów składników szkodliwych spalin na biegu luzem.
2. Badania potwierdziły niewielką przydatność pomiarów udziałów tlenu azotu na biegu luzem do oceny szkodliwości spalin silnikowych, gdyż w tym stanie pracy wykazują one niskie wartości, wielokrotnie mniejsze od występujących przy obciążeniu silnika, a więc w czasie pracy przewozowej autobusu. Wyniki te mają jednak istotny walor poznawczy, bo pozwalają ocenić skuteczność działania katalizatora w układach oczyszczania spalin.
3. Badania dowiodły znaczenia pomiaru współczynnika nadmiaru powietrza do oceny prawidłowości regulacji silnika, a w szczególności poprawności działania systemu oczyszczania spalin. Wzorcowe pod tym względem są wyniki otrzymane dla autobusów marki Solaris i MAN. Znaczny rozrzut tego współczynnika

dla pojazdów marki Jelcz, potwierdza ich gorszy stan techniczny od pozostałych pojazdów.

4. Wykonana weryfikacja obliczeniowa wyników pomiarów udziałów dwutlenku węgla w spalinach, dostarczyła wniosków o przydatności tej metody do pośredniej oceny jakości stosowanego paliwa oraz szczelności układu wylotowego spalin.

### BIBLIOGRAFIA

1. Merkiś J., Pielecha J., Radziński S., *Emisja zanieczyszczeń motoryzacyjnych w świetle nowych przepisów Unii Europejskiej*, WKiŁ, Warszawa 2012.
2. Romaniszyn K., *Alternatywne zasilanie benzyną oraz gazami LPG i CNG*, WNT, Warszawa 2007.
3. Szczęsny P., *Zasilanie silników spalinowych gazem ziemnym*, „Samochody Specjalne”, 2006, nr 2.
4. Szczęsny P., *Toksyczność spalin pojazdów osobowych podczas statystycznych badań eksploatacyjnych*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012, nr 1.
5. Szczęsny P., *Wpływ wybranych parametrów eksploatacyjnych na toksyczność spalin pojazdów z silnikami o zapłonie iskrowym*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013, nr 1.
6. [www.mzk.zamosc.pl](http://www.mzk.zamosc.pl)
7. [www.cng.auto.pl](http://www.cng.auto.pl)

8. [www.olsztyn.wm.pl](http://www.olsztyn.wm.pl)

9. [www.transport-publiczny.pl](http://www.transport-publiczny.pl)

10. [www.supernowosci24.pl/autobusy-na-gaz-sa-nieoplacalne](http://www.supernowosci24.pl/autobusy-na-gaz-sa-nieoplacalne)

### Chosen aspects of exhaust gases composition analysis of buses propelled by CNG

*The results of exhaust gases composition analysis in the city buses, adapted to be supplied by natural gas – CNG were presented. The investigated vehicles group contained three models: Jelcz 120M, Solaris Urbino 12 and MAN Lion's City A21. The results of CO<sub>2</sub> measurements were calculative verified, which allowed to conduct deepened analysis of ecological and operational characteristics of investigated buses.*

*In the introductory part of the paper the characteristics of current CNG propulsion usage in public transport buses in Poland were shown..*

Autorzy:

dr inż. **Piotr Szczęsny** – [pioszc@poczta.onet.pl](mailto:pioszc@poczta.onet.pl)

dr hab. **Grażyna Orlicz-Szczęsna** – Uniwersytet Medyczny w Lublinie, Katedra i Klinika Chorób Wewnętrznych; 20-080 Lublin, ul. Staszica 16. Tel: + 48 81 5327717, [grazyna.orlicz@umlub.pl](mailto:grazyna.orlicz@umlub.pl)