

Paweł Fuć¹, Jerzy Merkisz², Andrzej Ziółkowski³

WPŁYW MASY ŁADUNKU NA EMISJĘ CO₂, NO_x I NA ZUŻYCIE PALIWA POJAZDU CIĘŻAROWEGO O MASIE CAŁKOWITEJ POWYŻEJ 12 000 KG

Streszczenie. Cykliczny wzrost liczby przewożonych ładunków przy użyciu pojazdów samochodowych jest ściśle powiązany zarówno ze wzrastającą liczbą pojazdów ciężarowych jak i z większym nasileniem ruchu drogowego, co w wielu przypadkach skutkuje powstawaniem kongestii drogowych. Wynikiem tego jest zwiększenie negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne pojazdów ciężarowych. W poniższym artykule wyznaczono wpływ masy przewożonego ładunku na emisję CO₂, NO_x oraz na przebiegowe zużycie paliwa. W tym celu przeprowadzono drogowe badania emisji spalin na odcinkach pomiarowych, odwzorowujących dojazd do miejsca załadunku oraz symulujących ruch po drogach krajowych. Badaniom poddano zespół pojazdów – ciągnik siodłowy z naczepą – w dwóch konfiguracjach: bez i z ładunkiem. Masa ładunku wynosiła 20 000 kg. Do badań wykorzystano mobilny analizator spalin SEMTECH DS. W oparciu o przeprowadzone drogowe badania emisji wykazano również wpływ warunków jazdy na emisję CO₂ i NO_x pojazdów ciężarowych obciążonych ładunkiem.

Słowa kluczowe: pojazd ciężarowy, emisja spalin, badania drogowe.

WPROWADZENIE

Według opublikowanego raportu GUS (Główny Urząd Statystyczny) „Transport – wyniki działalności w 2010 r.” łączna liczba przewiezionych towarów wszystkimi rodzajami transportu wyniosła 1838,5 mln ton, co stanowiło wzrost o 8,7% w stosunku do 2009 roku [1]. Największy udział w rynku przypadł dla sektora transportu samochodowego, którego udział wyniósł 84,4% (tabl. 1). Zwrócono także uwagę, że udział sektora transportu samochodowego w rynku przewozów ładunków wzrósł o 8,5% w stosunku do 2005 roku. Fakt ten wynika bezpośrednio ze wzrostu liczby zarejestrowanych pojazdów ciężarowych, która na koniec 2010 roku wyniosła 2,6 mln sztuk – stanowi to wzrost o 7% w odniesieniu do roku poprzedniego. Liczba ciągników siodłowych wrosła o 6,6 % w porównaniu do roku 2009 i wyniosła 214,6 tys. sztuk [4].

¹ Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Poznańska, e-mail: pawel.fuc@put.poznan.pl

² j.w., e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl

³ j.w., e-mail: andrzej.wo.ziolkowski@doctorate.put.poznan.pl

Tabela 1. Struktura udziału w rynku przewozów ładunków poszczególnych rodzajów transportu [4]

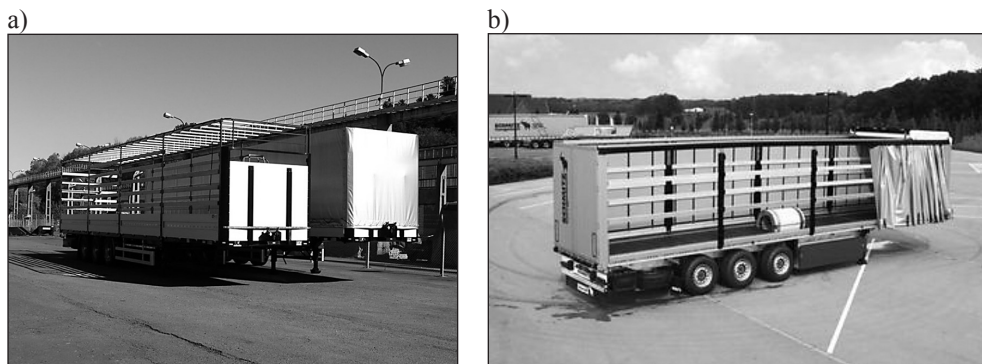
Rodzaj transportu	Udział [%]		
	2005	2009	2010
Transport samochodowy	75,9	84,3	84,4
Transport kolejowy	18,9	11,9	11,8
Transport lotniczy	0,0	0,0	0,0
Transport rurociągowy	3,8	3,0	3,1
Żegluga śródlądowa	0,7	0,3	0,3
Żegluga morska	0,7	0,5	0,4

RODZAJE NACZEP WYKORZYSTYWANYCH DO TRANSPORTU TOWARÓW

Jednym z podstawowych środków transportu wykorzystywanym do przewozu ładunków jest naczepa [2]. Naczepa z definicji jest pojazdem kołowym bez własnego napędu, spoczywającym częściowo na innym pojeździe – ciągniku siodłowym. Wyróżnia się następujące rodzaje naczep:

- skrzyniowo-plandekowe i kurtynowe;
- furgonowe (chłodnie, izotermy);
- podkontenerowe;
- samowyładowcze;
- niskopodwoziowe;
- cysterny.

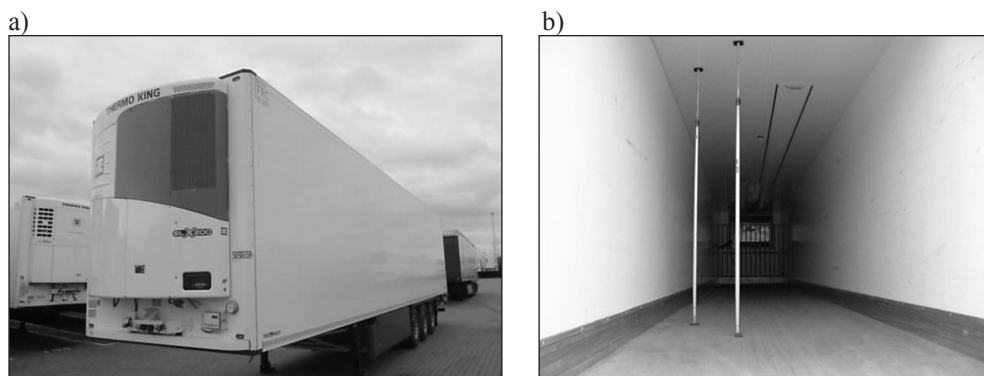
Najpowszechniej wykorzystywane są obecnie naczepy skrzyniowo-plandekowe i kurtynowe (rys. 1), ponieważ dzięki standardowym wymiarom umożliwiają transport większości towarów niewymagających specjalnych warunków przewozu [1].



Rys. 1. Naczepa skrzyniowo-plandekowa (a) oraz naczepa kurtynowa (b) [5, 6]

Ze względu na duże zróżnicowanie przewożonych towarów producenci naczepek posiadają w swojej ofercie specjalne odmiany naczepek szkrzyniowo-plandekowych i kurtynowych. Należy tutaj wymienić m.in. naczepy typu *mega* – o zwiększonej wysokości przestrzeni ładunkowej (3 m, gdzie wysokość standardowa wynosi 2,7 m), naczepy typu *coil mulda* – specjalnie przygotowana podłoga naczepy do przewozu stali w rolach oraz naczepy typu *paper* – do przewozu papieru. Tego typu rozwiązania są wymagane zarówno w celu zagwarantowania bezpieczeństwa podczas przewozu ww. towarów jak i wydłużenia czasu eksploatacji naczepek.

Naczepy furgonowe wykorzystywane są do przewozu towarów w specjalnych warunkach klimatycznych (stała temperatura w przestrzeni ładunkowej) z możliwością ciągłego monitoringu i ewentualnej regulacji temperatury przewożonych towarów w zakresie $-30-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 2). Regulacja temperatury w przestrzeni ładunkowej możliwa jest jedynie w przypadku naczepek typu chłodnia, ponieważ są one wyposażane w specjalne agregaty chłodnicze. Naczepy typu izoterma nie są wyposażane w agregaty chłodnicze i umożliwiają zachowanie stałej temperatury jedynie na krótkich odcinkach ze względu na ograniczenia wynikające z wymiany ciepła przestrzeń ładunkowa – otoczenie.



Rys. 2. Naczepa typu chłodnia (a) oraz wnętrze przestrzeni ładunkowej (b) [5]

Spadek ilości towarów sypkich transportowanych koleją takich jak: węgiel kamienny, żwir, tłuć, piasek, itp. przełożył się bezpośrednio na wzrost udziału pojazdów samochodowych wykonujących transport ww. towarów [1]. Było to spowodowane spadkiem popularności transportu kolejowego oraz dynamicznym rozwojem specjalistycznych pojazdów służących do przewozu materiałów sypkich (rys. 3). Pojawienie się na rynku szerokiej oferty naczepek samowyładowczych dostosowanych do przewozu większości materiałów sypkich umożliwiło skrócenie czasu transportu w porównaniu do transportu koleją. Główną wadą transportu kolejowego jest brak możliwości dostarczenia towaru bezpośrednio do klienta. Wymagane jest przeładunek towaru na pojazd samochodowy i następnie dostarczenie pod wskazany adres. W wielu przypadkach to znacznie wydłuża czas i koszty transportu. Na

rynku oferowanych jest wiele typów naczep samowyładowczych zaszeregowanych według następujących kryteriów:

- kubatura skrzyń wywrotczych,
- długość ramy,
- typ tylnego zamknięcia skrzyni wywrotczej.



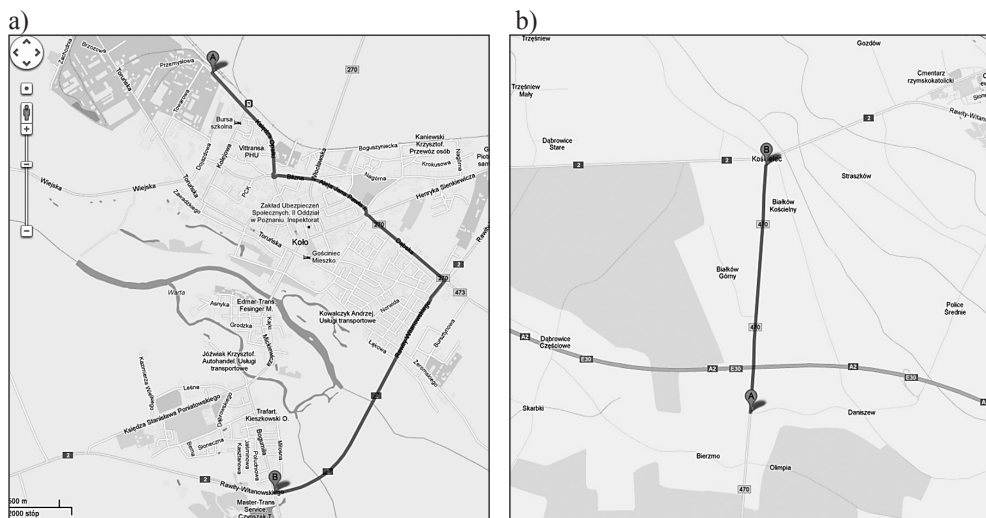
Rys. 3. Naczepa samowyładowcza z zamknięciem skrzyni wywrotczej typu drzwi [6]

PROCEDURA BADAWCZA

Drogowe badania emisji CO_2 , NO_x oraz przebiegowego zużycia paliwa w rzeczywistych warunkach eksploatacji przeprowadzono na odcinkach pomiarowych symulujących jazdę miejską (rys. 4a) i jazdę pozamiejską (rys. 4b). Przy wyborze odcinków pomiarowych kierowano się możliwością odwzorowania ruchu pojazdów ciężarowych w następujących konfiguracjach:

- dojazd do miejsca załadunku obejmujący zarówno ruch po drogach krajowych jak i po drogach miejskich (w pierwszym przypadku maksymalna dopuszczalna prędkość pojazdu ciężarowego określona przepisami ruchu drogowego wynosi 70 km/h, a w drugim prędkość ta wynosi 50 km/h lub 40 km/h) – zwana dalej „jazda miejska”;
- jazda po drogach krajowych (maksymalna dopuszczalna prędkość pojazdu ciężarowego określona przepisami ruchu drogowego wynosi 70 km/h) – zwana dalej „jazda pozamiejska”.

Kolejnym ważnym kryterium decydującym o wyborze tras badawczych było usytuowanie dzielnicy przemysłowej (w miejscowości gdzie prowadzono pomiary), a tym samym należało uwzględnić obowiązujące ograniczenia drogowe dotyczące dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów ciężarowych. Wspólną cechą odcinków pomiarowych była ich zbliżona długość, która wyniosła 4,5 km.



Rys. 4. Odcinki pomiarowe wybrane do drogowych badań emisji: odwzorowanie jazdy miejskiej (a), odwzorowanie jazdy pozamiejskiej (b) [wykonano na podstawie google maps]

Obiektem badawczym był zespół pojazdów ciągnik siodłowy – naczepa (zwany dalej pojazdem ciężarowym) o masie własnej 15 200 kg (rys. 5-6). Badania emisji spalin przeprowadzono na ww. trasach badawczych w dwóch konfiguracji pojazdu ciężarowego: bez ładunku i z ładunkiem. Pojazd wyposażony był w jednostkę napędową o mocy 309 kW (420 KM) spełniającą normę emisji spalin Euro III (tabl. 2).



Rys. 5. Ciągnik siodłowy z zamontowanym przepływomierzem do pomiaru masowego natężenia przepływu spalin zaznaczony strzałką



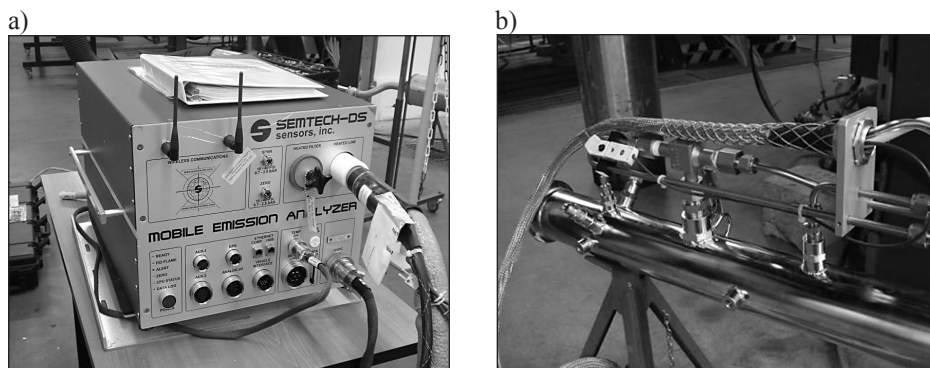
Rys. 6. Pojazd ciężarowy przygotowany do pomiarów emisji spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Tabela 2. Charakterystyka badanego zespołu ciągnik siodłowy – naczepa

Parametr	Wartość
Pojemność silnika	11,7 dm ³
Liczba cylindrów	6
Liczba zaworów na cylinder	4
Moc maksymalna	309 kW przy 1900 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	2000 Nm przy 1100÷1300 obr/min
Norma emisji spalin	Euro III
Układ oczyszczania spalin	brak
Rodzaj naczepy	kurtynowa
Masa własna zespołu pojazdów	15 200 kg
Masa ładunku	20 000 kg

Do pomiarów emisji CO₂, NO_x oraz przebiegowego zużycia paliwa wykorzystano mobilny przyrząd SEMTECH DS (rys. 7a) zaliczany do grupy PEMS (*Portable Emissions Measurement System*). Pomiar stężenia CO₂ odbywał przy użyciu analizatora NDIR (*Non-Dispersive Infrared*) wykorzystującego metodę niedispersyjną na podczerwień, a stężenie NO_x mierzono analizatorem NDUV (*Non-Dispersive Ultraviolet*) wykorzystującego metodę niedispersyjną na ultrafiolet. Przyrząd posiadał własną stację meteorologiczną umożliwiającą pomiar ciśnienia, temperatury oraz wilgotności powietrza. Dzięki temu wyznaczono współczynnik korekcji wilgotności K_H wykorzystywany przy pomiarach stężenia NO_x. Przyrząd wyposażony był także w moduł GPS (*Global Positioning System*) oraz umożliwiał komunikację z syste-

mem diagnostycznym pojazdu [3]. Pomiar masowego natężenia przepływu gazów wylotowych odbywał się przy użyciu przepływomierza o średnicy 4" działającego na zasadzie rurki Pitota (rys. 7b).



Rys. 7. Przyrząd SEMTECH DS (a) oraz przepływomierz do pomiaru masowego natężenia przepływu spalin (b)

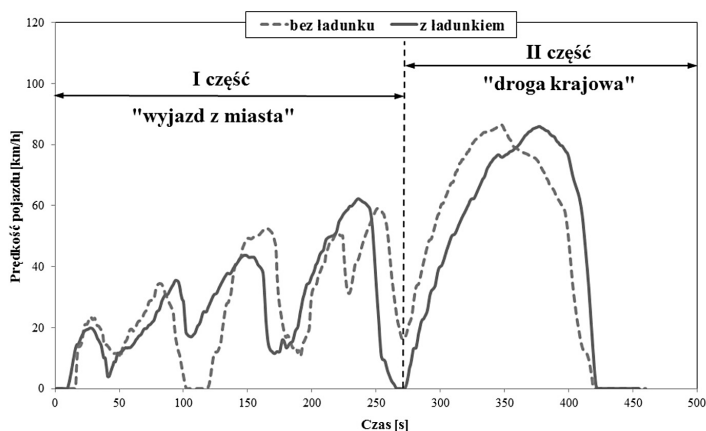
WYNIKI BADAŃ – ANALIZA

Badania na odcinku pomiarowym „jazda miejska”

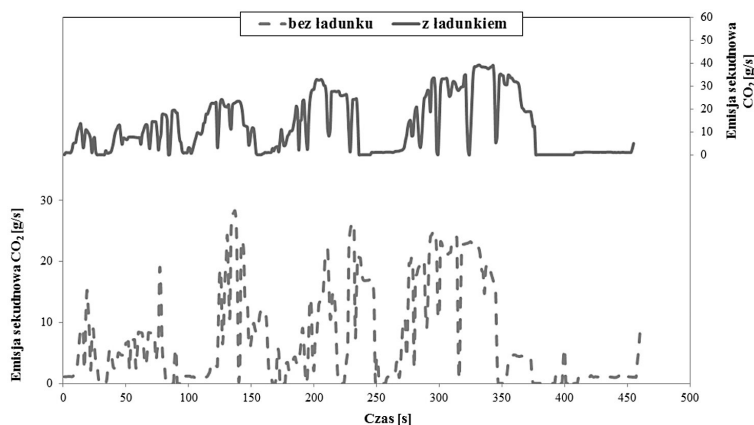
Na podstawie uzyskanych wartości stężeń CO_2 , NO_x , masowego natężenia przepływu gazów wylotowych, a także informacji odczytanych z modułu GPS oraz układu diagnostycznego pojazdu wyznaczono emisję NO_x , CO_2 oraz wartości przebiegowego zużycia paliwa.

Na odcinku pomiarowym odwzorowującym jazdę miejską uzyskano zbliżone profile prędkości dla pojazdu ciężarowego bez ładunku i z ładunkiem (rys. 8). W obu przypadkach średnia prędkość pojazdu wyniosła 35 km/h, a czas przejazdu wyniósł 460 s. Powyższe fakty pozwoliły na wyznaczenie wpływu masy ładunku na emisję mierzonych składników gazów wylotowych. Pierwsza część trasy rozpoczynała się przy jednym z głównych zakładów przemysłowych – miejscu gdzie codziennie przeładowywanych jest 50 pojazdów ciężarowych – następnie przebiegała przez miasto (czas przejechania tego odcinka wyniósł 280 s). Druga część odcinka pomiarowego przebiegała fragmentem obwodnicy miasta (droga krajowa) aż do trasy dojazdowej na autostradę A2. Czas przejechania tego odcinka wyniósł 180 s, a maksymalna prędkość uzyskana przez pojazd wyniosła 83 km/h.

Średnie wartości emisji sekundowej CO_2 w pierwszej części „jazdy miejskiej” wyniosły odpowiednio: 7 g/s dla pojazdu bez ładunku i 11 g/s dla pojazdu z ładunkiem (rys. 9). Wynikało to z infrastruktury odcinka pomiarowego – cykliczne zatrzymania spowodowane występowaniem węzłów komunikacyjnych oraz zbliżona prędkość pojazdu w obu konfiguracjach. Zwrócono także uwagę, że przejazdy odby-



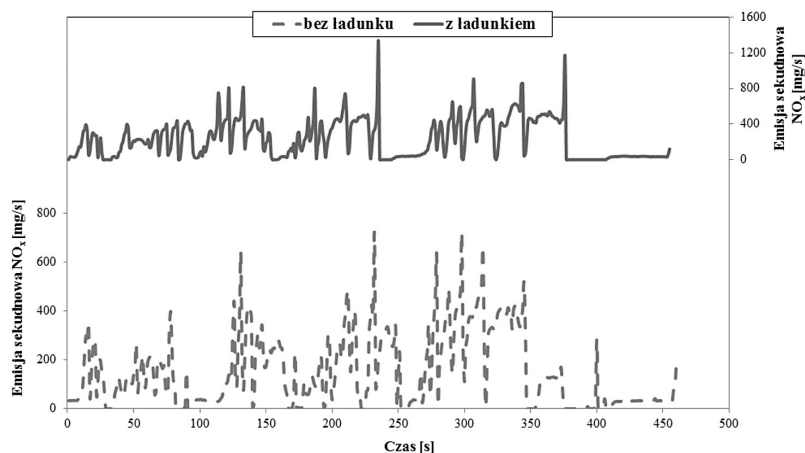
Rys. 8. Uzyskane profile prędkości podczas drogowych badań emisji na odcinku pomiarowym „jazda miejska”



Rys. 9. Emisja sekundowa CO_2 uzyskana podczas drogowych badań emisji na odcinku pomiarowym „jazda miejska”

wały się bez udziału kongestii drogowych. W drugiej części odcinka pomiarowego zauważono znaczący wzrost maksymalnych wartości emisji sekundowej CO_2 dla pojazdu z ładunkiem – o 60%. Było to efektem większego zapotrzebowania energetycznego (wzrost zużycia paliwa) pojazdu obciążonego ładunkiem w celu osiągnięcia tej samej prędkości co pojazd bez ładunku. Bardzo podobnie ukształtował się przebieg emisji sekundowej tlenków azotu (rys. 10). Jej najwyższa wartość wystąpiła dla pojazdu obciążonego ładunkiem. Zaobserwowano także charakterystyczny wzrost emisji NO_x w momencie przyspieszania pojazdu, co wynikało z większej dawki paliwa dla pojazdu obciążonego ładunkiem, a tym samym w komorze spalania silnika wzrastała temperatura i średnie ciśnienie użyteczne – warunki sprzyjające

powstawaniu NO_x . Taki przebieg emisji sekundowej NO_x zarówno dla pojazdu bez ładunku jak i z ładunkiem wynikał z braku pozasilnikowych układów oczyszczania gazów wylotowych.



Rys. 10. Emisja sekundowa NO_x uzyskana podczas drogowych badań emisji na odcinku pomiarowym „jazda miejska”

Przebiegowe zużycie paliwa pojazdu ciężarowego podczas badań emisyjności obliczono wykorzystując metodę bilansu węgla (*carbon balance*):

$$Q = \frac{0,1155}{\rho_{pal}} [(0,866 \cdot HC) + (0,426 \cdot CO) + (0,273 \cdot CO_2)] \quad (1)$$

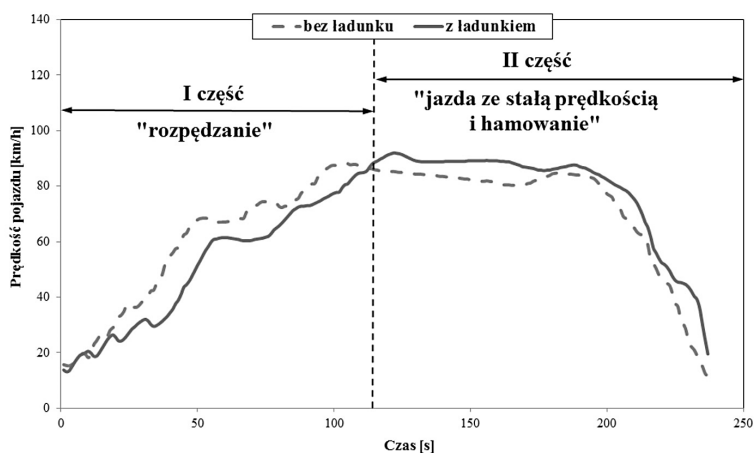
gdzie: Q – wartość przebiegowego zużycia paliwa [$\text{dm}^3/100 \text{ km}$]; HC , CO , CO_2 – średnie wartości emisji drogowej [g/km]; ρ_{pal} – gęstość paliwa w normalnej temperaturze $15 \text{ }^\circ\text{C}$ [g/cm^3].

W oparciu o doświadczenie badawcze autorów z zakresu pomiarów emisji gazów wylotowych pojazdów ciężarowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji zdecydowano pominąć w równaniu (1) człony dotyczące emisji HC i CO . Potwierdzeniem tego są relatywnie małe wartości emisji drogowej HC i CO oraz duży udział emisji CO_2 w gazach wylotowych pojazdów ciężarowych. Stąd wniosek, że emisja drogowa HC i CO w przypadku pojazdów ciężarowych nie ma istotnego wpływu na wartość przebiegowego zużycia paliwa.

Podczas badań na odcinku pomiarowym „jazda miejska” uzyskano wartości przebiegowego zużycia odpowiednio: $29 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$ dla pojazdu bez ładunku i $49 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$ dla pojazdu z ładunkiem. Stanowiło to wzrost o 68% dla pojazdu obciążonego ładunkiem.

Badania na odcinku pomiarowym „jazda pozamiejska”

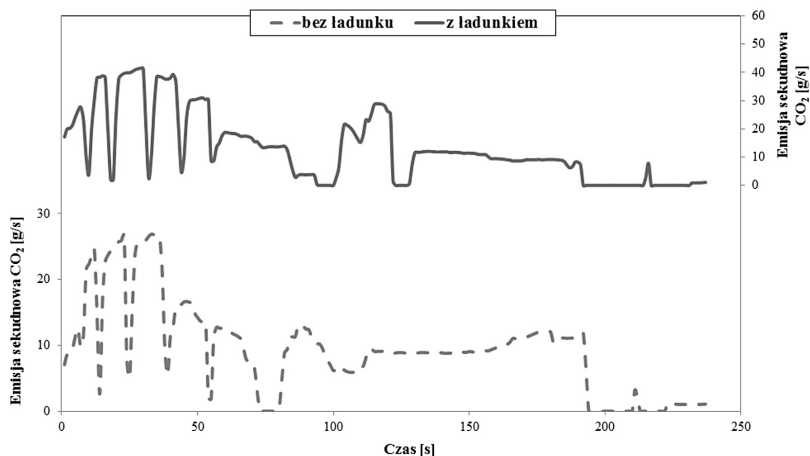
Na odcinku pomiarowym „jazda pozamiejska” – podobnie jak w przypadku „jazdy miejskiej” – uzyskano zbliżone profile prędkości dla pojazdu bez ładunku i z ładunkiem (rys. 11). Zauważono także, że pierwsza faza odcinka pomiarowego charakteryzowała się uzyskaniem mniejszych wartości prędkości dla pojazdu z ładunkiem. Średnia prędkość pojazdu bez ładunku wyniosła 66 km/h i była wyższa o 0,5% niż średnia prędkość pojazdu z ładunkiem. Tak niewielka różnica pozwoliła na porównanie uzyskanych wartości emisji CO_2 , NO_x oraz przebiegowego zużycia paliwa dla obu przejazdów.



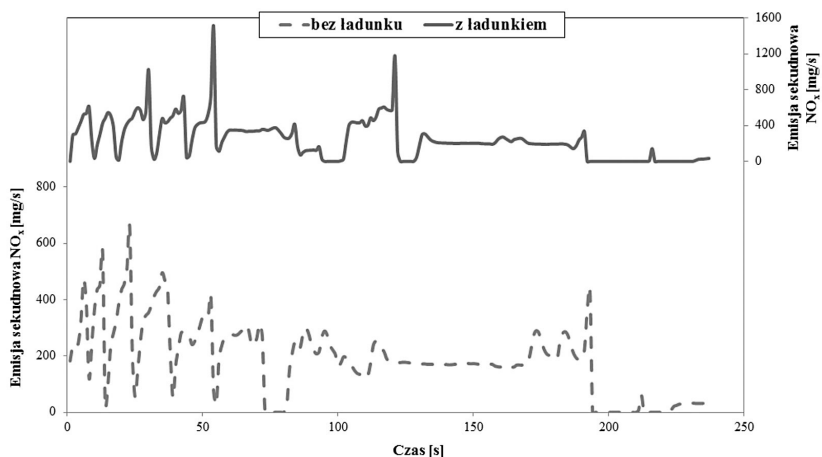
Rys. 11. Uzyskane profile prędkości podczas drogowych badań emisji na odcinku pomiarowym „jazda pozamiejska”

Emisja sekundowa CO_2 dla pojazdu z ładunkiem była wyższa w trakcie całego przejazdu w porównaniu do pojazdu bez ładunku (rys. 12). Największe różnice przypadły dla pierwszej części odcinka pomiarowego i wynikały z jego przebiegu – ta część obejmowała wyłącznie rozpędzanie pojazdu. Faza rozpędzania pojazdu charakteryzuje się wyraźnym wzrostem zużycia paliwa gdyż w bardzo krótkim czasie należy dostarczyć do cylindra dużą ilość paliwa, co skutkuje powstaniem obszarów w komorze spalania, gdzie współczynnik nadmiaru powietrza jest mniejszy od jedności – warunki sprzyjające występowaniu niepełnego i niecałkowitego spalania – wpływa to na obniżenie sprawności ogólnej obiegu termodynamicznego. Średnia wartość emisji sekundowej CO_2 dla pojazdu bez ładunku wyniosła 9,3 g/s, co stanowiło 72% średniej emisji CO_2 dla pojazdu z ładunkiem.

W pierwszej części odcinka pomiarowego poziom emisji sekundowej NO_x był zbliżony dla obu konfiguracji pojazdu (rys. 13). Największe różnice w emisji wystąpiły od



Rys. 12. Emisja sekundowa CO₂ uzyskana podczas drogowych badań emisji na odcinku pomiarowym „jazda pozamiejska”

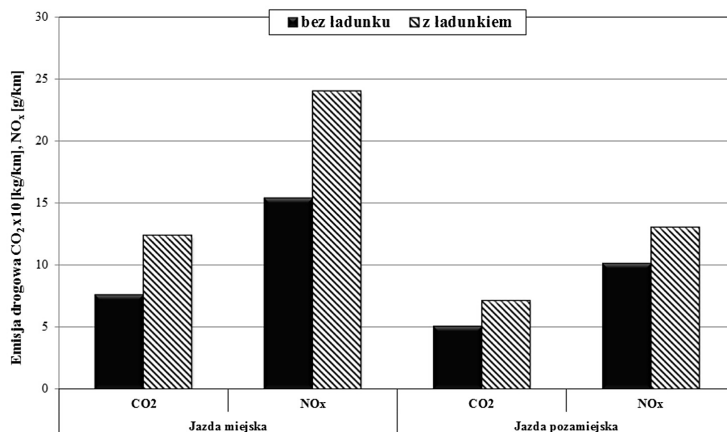


Rys. 13. Emisja sekundowa NO_x uzyskana podczas drogowych badań emisji na odcinku pomiarowym „jazda pozamiejska”

30.s pomiaru. Maksymalna wartość emisji NO_x przypadła dla pojazdu z ładunkiem i związana była z uzyskanymi większymi wartościami przyspieszeń niż pojazdu bez ładunku – zaobserwowano, że profil ruchu pojazdu bez ładunku charakteryzował się stałym wzrostem prędkości. Średnia wartość przebiegowego zużycia paliwa pojazdu bez ładunku wyniosła 19 dm³/100km i była niższa o 8 dm³/100 km niż średnia wartość przebiegowego zużycia paliwa pojazdu z ładunkiem. Tak niskie wartości wynikały z braku zatrzymań pojazdu, a także z jazdy ze stałą prędkością przez większą część odcinka pomiarowego (około 130 s).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Odcinek pomiarowy odwzorowujący jazdę miejską charakteryzował się największymi wartościami średniej emisji drogowej CO_2 i NO_x dla obu konfiguracji pojazdu (rys. 14). Na tym odcinku wartość średniej emisji drogowej CO_2 dla pojazdu bez ładunku wyniosła 0,76 kg/km i była o 0,25 kg/km większa niż wartość emisji na odcinku pomiarowym symulującym jazdę pozamiejską. Dla pojazdu z ładunkiem wartość ta wyniosła 1,2 kg/km i była o 40% większa niż dla odcinka „jazda pozamiejska”. W przypadku średniej wartości emisji drogowej NO_x na odcinku pomiarowym „jazda miejska” dla pojazdu bez ładunku emisja wyniosła 15,4 g/km i była o 35% niższa niż na odcinku „jazda pozamiejska”. Dla pojazdu z ładunkiem sytuacja ta kształtowała się podobnie i na odcinku „jazda miejska” uzyskano emisję NO_x 24 g/km, co stanowiło 154% emisji uzyskanej na odcinku odwzorowującym warunki pozamiejskie.



Rys. 14. Wartości emisji drogowej CO_2 , NO_x uzyskane podczas drogowych badań emisji

W oparciu o przeprowadzone badania emisji pojazdu ciężarowego w rzeczywistych warunkach eksploatacji wyznaczono wpływ masy ładunku na emisję CO_2 , NO_x oraz na przebiegowe zużycie paliwa. W przypadku gdy masa ładunku wynosiła 20 000 kg uzyskano następujące zależności:

- „trasa miejska”:
 - wzrost emisji drogowej CO_2 o 62%;
 - wzrost emisji drogowej NO_x o 56%;
 - wzrost przebiegowego zużycia paliwa o 67%;
- „trasa pozamiejska”:
 - wzrost emisji drogowej CO_2 o 41%;
 - wzrost emisji drogowej NO_x o 29%;
 - wzrost przebiegowego zużycia paliwa o 45%.

Kolejnym istotnym wnioskiem jest fakt, że w przypadku pojazdów ciężarowych dostosowanych do długodystansowych przewozów towarów im mniejsza jest oscylacja przyspieszeń (duży udział jazdy ze stałą prędkością) tym mniejszy jest wzrost emisji CO₂, NO_x i przebiegowego zużycia paliwa – w przypadku pojazdów obciążonych ładunkiem. Tym samym zasadnym staje się prowadzenie prac mających na celu stworzenie, bądź dostosowanie istniejącej infrastruktury logistyczno-drogowej tak, aby efektywność wykonywanych przewozów był najwyższa. Przez to możliwe będzie ograniczenie negatywnego oddziaływania środków transportu na środowisko naturalne.

LITERATURA

1. Piernikarski D.: Sprzedaż naczep w 2011 r., *Samochody Specjalne* 4/2012
2. Prochowski L., Żuchowski A.: *Samochody ciężarowe i autobusy*, WKiŁ, Warszawa 2011.
3. SEMTECH®-DS On Board, In-Use Emissions Analyzer, Manual, Michigan 2007.
4. Turek D. i inni: Transport – wyniki działalności w 2010 r., GUS, Departament Handlu i Usług, www.stat.gov.pl
5. www.cargobull.com
6. www.zaslaw.pl

IMPACT OF MASSES LOAD FOR CO₂, NO_x EMISSION AND FUEL CONSUMPTION HEAVY DUTY VEHICLES A TOTAL MASS EXCEEDING ABOUT 12 000 KG

The cyclical rise in the number of transported loads using heavy duty vehicles is closely related to both the increasing number of vehicles and with higher intensity road traffic, which in many cases resulted in the formation of traffic congestion. The result is an increase in negative environmental impact of trucks. In this paper determined the impact of mass transported load for CO₂, NO_x emissions and fuel consumption. For this purpose performed emissions research under real operating conditions at intervals of measurement mapping access place of loading and mapping movement by roads. The research was a combination of vehicles – tractor-trailer – in two configurations: with and without load. Load weight was 20 000 kg. Were used in portable emissions gas analyzer SEMTECH DS. Based on our road emission tests also demonstrated the impact of traffic conditions on the emission of CO₂ and NO_x loaded heavy duty vehicles.

Key words: heavy duty vehicles, exhaust emission, test under real operating conditions