

Andrzej Gągorowski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

BADANIE WYBRANEGO POŁĄCZENIA W UKŁADZIE WYLOTOWYM Z UWZGLĘDNIENIEM ANALIZY AKUSTYCZNEJ

Rękopis dostarczono: kwiecień 2018

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania wybranego rodzaju połączenia układu wylotowego na przykładzie elementu o określonym kącie wygięcia, łączącego kolektor wydechowy z katalizatorem. Odzwzorowano rzeczywiste rozwiązanie o strukturze cylindrycznej łukowej oraz określono wpływ parametrów krzywizny na zmiany tłumienia energii akustycznej. Modelowanie i symulacje akustycznych przepływów gazodynamicznych w układzie wydechowym oparto na specjalistycznym pakiecie obliczeniowym CFD (Computer Fluid Dynamics), mianowicie AVL AST. W celu ilościowego określenia stopnia wpływu przyjętego stopnia zakrzywienia elementu połączeniowego dokonano porównania badanej struktury z elementem prostoliniowym (z łącznikiem prostym).

Słowa kluczowe: układ wylotowy, połączenie kolektor - katalizator, przepływ gazodynamiczny

1. WSTĘP

Układy wylotowe silników spalinowych stanowią obecnie bardzo istotny obszar badań nie tylko ze względu na powszechne zanieczyszczenie powietrza, ale również ze względu na wszechobecny problem hałasu, którego głównym źródłem jest transport samochodowy [6][8][9]. Należy również zaznaczyć, że spełniają one szereg innych funkcji koniecznych do prawidłowej eksploatacji pojazdu samochodowego, w tym są niezbędne do poprawnej pracy silnika[12][19]. Kwestię zanieczyszczeń środowiska hałasem uznano w Unii Europejskiej za zadanie priorytetowe [4][5]. Układy wylotowe podlegają normatywnym ograniczeniom dopuszczalnej emisji hałasu do środowiska oraz procesowi homologacji[5][17].

Układ wylotowy silnika spalinowego odgrywa główną rolę w procesie transportu i przetwarzania energii spalin. Spaliny powstające podczas eksploatacji pojazdu są źródłem energii o różnej postaci, dlatego konieczne jest zastosowanie konstrukcji złożonej z wielu elementów i urządzeń, które pozwalają kształtować zarówno energię cieplną, chemiczną, mechaniczną czy też akustyczną. Mamy tu do czynienia z układem otwartym, w którym następuje odprowadzanie medium do otoczenia w ukształtowanej formie.

Najczęściej wśród najważniejszych elementów układu wylotowego mających wpływ na kształtowanie energii akustycznej wymienia się zespoły tłumików akustycznych oraz układy kolektora i katalizatora. W tym zakresie w literaturze światowej w można znaleźć więcej badań[7][11][13][18][20]. Nie należy jednak zapominać o całym systemie połączeń tych struktur, których geometria może być bardzo zróżnicowana w zależności od implementacji w określonym modelu pojazdu samochodowego. Ilość badań w tym zakresie jest bardzo ograniczona i częściej analizowane są one z punktu widzenia wpływu na pracę silnika[12]. Dlatego też w artykule przedstawiono badania wybranego połączenia o określonej geometrii i jego wpływu na zachowanie się energii akustycznej powstającej podczas przepływu spalin.

Jak zaznaczono na wstępie, w systemie silnik - układ wylotowy możemy wyróżnić różne rodzaje transportowanej i przetwarzanej energii, przy czym zmiany parametrów poszczególnych jej form podczas przepływu następują bardzo szybko i nieliniowo[1][2]. Z powyższych faktów wynika złożoność zachodzących procesów i trudność w przeprowadzeniu poprawnej analizy dla określonych warunków eksploatacyjnych. Dlatego modelowanie procesów transportu i przetwarzania energii podczas przepływów gazodynamicznych przedstawiane jest często w różnych stopniach uproszczenia w oparciu o teorię akustyki liniowej[2]. Bardziej szczegółowa analiza wymaga natomiast opisanie nieliniowych przepływów przez kolejne struktury systemu z uwzględnieniem dynamicznych, lokalnych zmian temperatury, ciśnienia, prędkości i gęstości spalin. Uwzględniając zmiany tych parametrów w czasie, ich opis możliwy jest przy zastosowaniu nieliniowych równań Naviera - Stokesa lub Eulera[14], co z kolei wymusza zastosowanie metod numerycznych przy ich rozwiązywaniu.

Badania modelowe przeprowadzono z zastosowaniem metody elementów objętościowych z użyciem techniki CFD (computer Fluid Dynamics) dla wybranej geometrii krzywizny na przykładzie połączenia kolektora z katalizatorem. Odwzorowano kształt i parametry rzeczywistego rozwiązania stosowanego w układach wylotowych silników spalinowych. Analizę akustyczną wykonano dla układu wylotowego z elementem o strukturze krzywoliniowej charakteryzujący się określonymi kątami wygięcia. Jej wpływ na kształtowanie się energii akustycznej w układzie określono poprzez wyznaczenie tłumienia przenoszenia układu przy założonych stopniach wygięcia. Modelowanie i symulacje akustycznych przepływów gazodynamicznych w układzie wylotowym z uwzględnieniem analizowanego rozwiązania oparto na specjalistycznym pakiecie obliczeniowym CFD - AVL AST, dedykowanym zastosowaniom motoryzacyjnym.

2. BUDOWA MODELU WYBRANEGO POŁĄCZENIA UKŁADU WYLOTOWEGO

Dokonując analizy rozwiązań połączeń stosowanych w układach wylotowych można zauważyć bardzo duże zróżnicowanie elementów stosowanych w różnych modelach pojazdów samochodowych. Z kolei rozwój firm, których głównym profilem działalności są

modyfikacje układów wylotowych świadczy o dużym zapotrzebowaniu w zakresie wprowadzania zmian w poszczególnych strukturach systemu.

Dostosowanie geometrii układu wylotowego do konstrukcji określonego modelu pojazdu samochodowego wymusza zastosowanie zarówno segmentów połączeniowych prostych jak i krzywoliniowych, które charakteryzują się różnymi parametrami. Wśród rozwiązań segmentów połączeniowych stosuje się łuki i wygięcia o różnych kształtach i geometrii krzywizn (np. kątowe, falowe, elementy o kilku stopniach wygięcia, krzywizny o różnej długości łuków i zmiennym kącie ugięcia). Z punktu widzenia teorii układów akustycznych, wszelkie zmiany kształtu, przekroju i innych parametrów geometrycznych połączeń strukturalnych, kanałów dolotowych czy wylotowych stanowią nieciągłości o różnej oporności falowej [3][15], mogące wywołać różne zjawiska falowe (w tym np. odbicia, zmiany kierunków czy też pochłanianie fal na określonym odcinku kanału przepływu). W efekcie mamy do czynienia z lokalnymi zmianami gęstości ośrodka, ciśnienia, jak również prędkości i kierunku przepływu oraz temperatury. Zgodnie z teorią dynamiki gazów zmiany geometrii struktury układu wywołują zmienny przepływ płynnego medium (w tym przypadku gazów spalinowych) m.in. poprzez powstawanie różnicy ciśnień na granicy określonych obszarów [16]. Ponieważ zmiany te zachodzą bardzo szybko, co wynika z dużej dynamiki procesów spalania, zastosowanie takiego elementu zamiast segmentu prostego wymusza zmiany w procesie przepływu spalin.

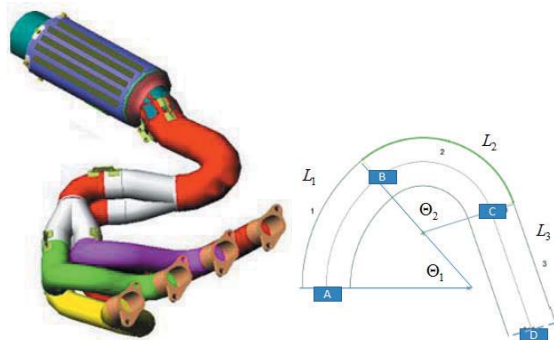
Jak wspomniano we wstępie, przedmiotem I etapu badań jest połączenie kolektor wydechowy - katalizator o strukturze krzywoliniowej cylindrycznej. W przypadku analizowanej struktury do kanału wylotowego kolektora silnika spalinowego został dodany element połączeniowy charakteryzujący się określonym stopniem wygięcia (uzyskano krzywiznę typu U). W efekcie spaliny przez określony czas płyną wąskim kanałem krzywoliniowym o zmiennej geometrii na długości segmentu połączeniowego do katalizatora, a następnie segmentami prostymi do tłumika końcowego.

Wykorzystując środowisko projektowe SolidWorks oraz specjalistyczny pakiet programowy do zastosowań motoryzacyjnych AVL AST zbudowano model połączenia katalizatora z kolektorem (rys. 1). W modelu krzywizny przyjęto podział segmentu połączeniowego na odcinki L_i o różnym stopniu zakrzywienia (L_1 -AB, L_2 -BC, L_3 -CD.). Ponadto założono, że:

- wygięty segment jest zdefiniowany przez promień ugięcia R_i dla i -tego odcinka rury,
- promień gięcia R_i określany jest z linii środkowej segmentu cylindrycznego,
- kąt ugięcia dla i -tego odcinka segmentu jest następnie obliczany na podstawie długości zdefiniowanej sekcji podzielonej przez promień gięcia zgodnie wzorem (1):

$$\Theta_i = \frac{L_i}{R_i} \quad (1)$$

Identyfikację parametrów przeprowadzono na podstawie rzeczywistych obiektów stosowanych w układach wylotowych. W tabelicy 1 przedstawiono wartości kątów ugięcia dla poszczególnych odcinków segmentu połączeniowego.



Rys. 1. Model połączenia kolektor - katalizator

Tablica 1

Wybrane parametry połączenia kolektor-katalizator

Θ_1 [°]	Θ_2 [°]	Θ_3 [°]
50	100	-

3. MODEL SYSTEMU SILNIK - UKŁAD WYLOTOWY

Model przepływu spalin w systemie silnik - układ wylotowy został zbudowany w środowisku programowym AVL AST (Advanced Simulation Tools) z uwzględnieniem modułu do obliczeń przepływów akustycznych AVL BOOST. Do struktury układu wylotowego włączono opisany w poprzednim rozdziale zbudowany model kolektor - katalizator z zastosowanym połączeniem o określonym kącie wygięcia oraz tłumik akustyczny refleksyjny. Katalizator modelowano jako układ równoległych kanałów w obudowie cylindrycznej (model "plastra miodu"), natomiast tłumik przyjęto jako urządzenie reaktywne z jedną komorą cylindryczną o średnicy zewnętrznej $D=150\text{mm}$ i długości $L=388\text{mm}$. Szczegółowy opis tego typu układów można znaleźć w pracy[10]. W tablicy 2 przedstawiono parametry geometryczne przyjęte w modelu układu wylotowego.

W tablicy 3 przedstawiono wybrane parametry odniesienia(początkowe) i warunki brzegowe przyjęte do obliczeń przy uwzględnieniu cyklu pracy silnika spalinowego czterosuwowego. W chwili rozpoczęcia otwierania zaworu wydechowego na początku układu wydechowego tworzą się impulsy nadciśnienia. Impulsy ten przemieszczają się wzdłuż układu. Prędkość przepływu uzależniona jest od zadanej prędkości obrotowej silnika. Regulacja składu mieszanki paliwowej określona jest przez współczynnik wyrażający stosunek powietrza do paliwa(A/F).

Tablica 2

Wybrane parametry układu wylotowego

Średnice kanałów środkowych, dolotowych i wylotowych	Długość układu wydechowego przed katalizatorem (część dolotowa)	Długość komory katalizatora	Długość układu wydechowego – kanał środkowy	Długość części dolotowej przed tłumikiem
5,1 mm	400 mm	200 mm	1310 mm	120 mm

Tablica 3

Wybrane parametry odniesienia i warunki brzegowe

Prędkość obrotowa $n[\text{rpm}]$	A/F	Ciśnienie $p[\text{MPa}]$	Temperatura $T[^\circ\text{C}]$
1200,0	14,5	0,1013	20,85

4. BADANIA UKŁADU

Przeprowadzone obliczenia z uwzględnieniem modeli opisanych w rozdziałach poprzednich pozwoliły wyznaczyć m.in. wartości ciśnienia i prędkości przepływów lokalnych spalin w określonych przekrojach systemu silnik - układ wylotowy w funkcji czasu, a następnie dokonać oceny tłumienia w założonej dziedzinie częstotliwości (0÷5000Hz).

W pracy, do analizy wpływu geometrii połączenia na poziom transmitowanej energii akustycznej, zastosowano wskaźnik określający tłumienie przenoszenia w układzie, mianowicie TL (z ang. Transmission Loss). Tłumienie przenoszenia zdefiniowano, jako różnicę pomiędzy poziomami mocy akustycznej (W) dźwięku padającego i propagowanego odpowiednio do i z segmentu układu wylotowego [10]:

$$TL = 10 \log \frac{W_{wej}}{W_{wyj}} \quad (2)$$

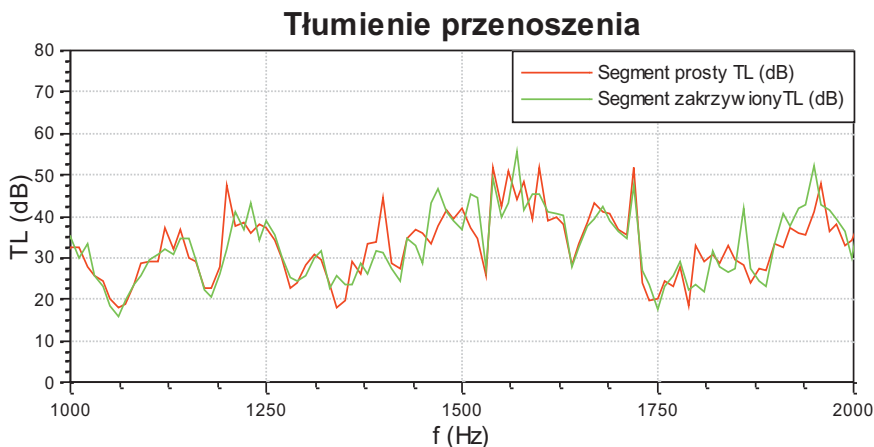
Poziom mocy akustycznej w określonym przekroju A układu można zdefiniować następująco:

$$W_i = \int_A \frac{|p|^2}{2\rho c} dA \quad (3)$$

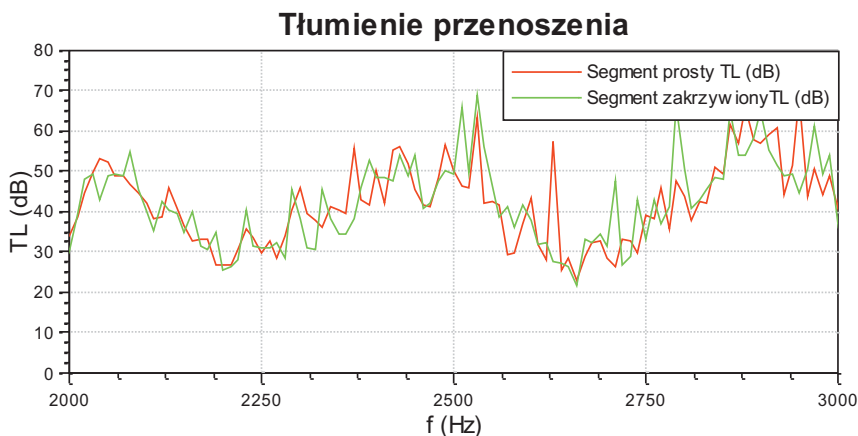
gdzie:

- p - amplituda ciśnienia w badanym przekroju układu,
- ρ - gęstość spalin,
- c - prędkość dźwięku.

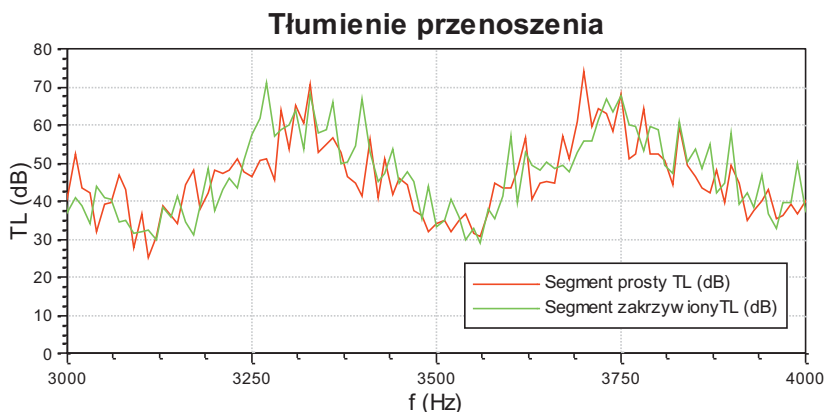
Uzyskane wyniki dla wybranych zakresów częstotliwości przedstawiono poniżej. Na kolejnych rysunkach (2-5) przedstawiono przebiegi poziomu tłumienia przenoszenia odpowiednio dla zakresów: 1000-2000Hz, 2000-3000Hz, 3000-4000Hz, 4000-5000Hz dla układu wylotowego z analizowanym połączeniem oraz układu klasycznego z segmentem prostym.



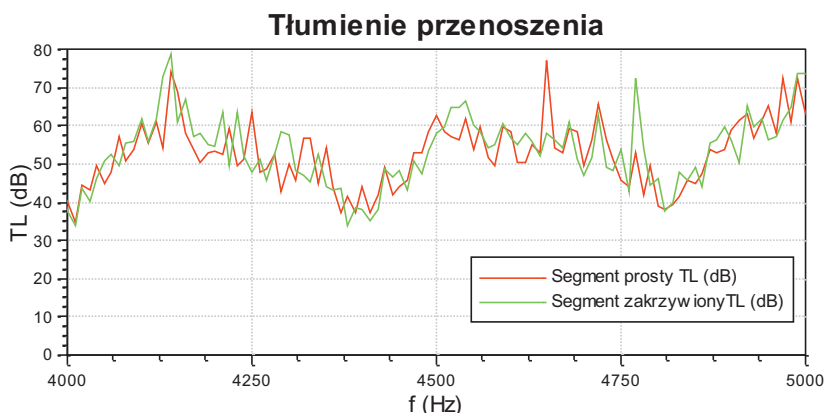
Rys. 2. Porównanie tłumienia przenoszenia w układzie wylotowym z zastosowaniem segmentu prostego i krzywoliniowego dla pasma - 1000-2000Hz



Rys. 3. Porównanie tłumienia przenoszenia w układzie wylotowym z zastosowaniem segmentu prostego i krzywoliniowego dla pasma - 2000-3000Hz



Rys. 4. Porównanie tłumienia przenoszenia w układzie wylotowym z zastosowaniem segmentu prostego i krzywoliniowego dla pasma - 3000-4000Hz



Rys. 5. Porównanie tłumienia przenoszenia w układzie wylotowym z zastosowaniem segmentu prostego i krzywoliniowego dla pasma - 4000-5000Hz

Analizując przebiegi parametru TL w funkcji częstotliwości można stwierdzić, że zastosowanie elementu krzywoliniowego powoduje istotne zmiany pod względem tłumienia energii akustycznej w stosunku do układu klasycznego. Porównując układ z segmentem prostym można zauważyć na wszystkich wykresach różnice w poszczególnych obszarach częstotliwościowych zarówno pod względem szerokości pasma, jak i wartości tłumienia przenoszenia. Analizując przebiegi TL pokazane na rys. 2-5 możemy zaobserwować w wielu obszarach zarówno silne wzmocnienie poziomu tłumienia przenoszenia jak i jego znaczącą redukcję. Uzyskano więc zarówno korzystne efekty w przypadku tłumienia hałasu, ale jednocześnie możemy zaobserwować dla wielu częstotliwości niekorzystne zjawisko wzmacniania energii akustycznej.

Duża zmienność przebiegów poziomu TL w całym analizowanym paśmie częstotliwości utrudnia ocenę i uzyskanie jednoznacznych wniosków wskazujących na korzyści z zastosowania połączenia o tak przyjętej geometrii. Dokonując oceny końcowej można wysnuć wnioski, że zastosowanie zmiennej geometrii w postaci krzywizny o określonym stopniu ugięcia wprowadziło do układu dodatkowe zaburzenia powstających zjawisk nieliniowych, czego efektem są silne zmiany energii akustycznej. Porównując analizowaną strukturę z segmentem prostoliniowym można stwierdzić, że analizowany element znacząco wpływa zarówno na poziom tłumienia jak i pasmo przenoszenia.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono badania modelowe wpływu wybranej geometrii elementu połączeniowego na odcinku kolektor - katalizator na poziom energii akustycznej w układzie wylotowym. Badany element charakteryzuje określony stopień wygięcia mający bezpośredni wpływ na sposób przepływu spalin i powstawania oporów gazodynamicznych oraz kształtowanie zjawisk falowych. Badania przeprowadzono z zastosowaniem metody elementów objętościowych z użyciem techniki "Computer Fluid Dynamics". Odwzorowano kształt i parametry rzeczywistego rozwiązania stosowanego w układach wylotowych. I etap objął badania układu z segmentem o trzech stopniach zakrzywienia (wygięcie typu U). Układ poddano analizie w zakresie tłumienia przenoszenia z uwzględnieniem pasma częstotliwościowego charakterystycznego dla silników spalinowych pojazdów samochodowych. Dokonano porównania wyników z przypadkiem konstrukcyjnym dla połączenia prostoliniowego o długości równej odpowiadającej analizowanemu elementowi o przyjętych kątach zakrzywienia. Pozwoliło to określić w sposób ilościowy wpływ zastosowanego stopnia wygięcia na poziom przenoszenia energii akustycznej w układzie. Przeprowadzona analiza pokazała, że zastosowanie elementu o odpowiednim kącie wygięcia może znacząco wpływać na przepływ energii akustycznej w układzie wylotowym i powodować zarówno silne jej wzmocnienia jak i dużą redukcję w zależności od analizowanego pasma częstotliwości. Dzięki wprowadzeniu do układu struktury krzywoliniowej łączącej kolektor z katalizatorem uzyskano różnice w przebiegu tłumienia przenoszenia w stosunku do segmentu prostego w całym zakresie, przy czym zmiany te należy określić jako silnie nieliniowe.

Dla uzyskania bardziej szczegółowych wniosków konieczne są badania innych przypadków - możliwych do zastosowania połączeń o zmiennej geometrii, w tym elementów z różnymi kątami ugięcia i długościami łuków, a następnie przeprowadzenie weryfikacji na stanowisku badawczym. Uzyskane wnioski z badań modelowych i eksperymentalnych będą podstawą do porównania różnych rozwiązań elementów połączeniowych możliwych do zastosowania w układach wylotowych.

The research has been conducted in the international program: "AVL AST University Partnership Program" (AVL, Graz, Austria)

Bibliografia

1. Bender E. K., Brammer A. J.: Internal combustion engine intake and exhaust system noise, *The Journal of the Acoustical Society of America* 58, 22, 1975.
2. Beranek L. L., Vér I.L.: *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. Wiley & Sons; New York 1992.
3. Bies D. A. , Hansen C. H. : *Engineering Noise Control Theory and Practice*. Spon Press - Taylor & Francis Group, London and New York, Third edition 2003.
4. Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady z dnia 25 czerwca 2002 r. w sprawie oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku, 2002.
5. Dyrektywa 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 września 2007 r. ustanawiająca ramy dla homologacji pojazdów silnikowych i ich przyczep oraz układów, części i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do tych pojazdów („dyrektywa ramowa”) (Dz. Urz. UE L 263 z 09.10.2007, z późn. zm.).
6. Gągorowski A., Korzeb J.: Ocena hałasu drogowego w świetle przepisów unijnych i krajowych, *Logistyka*, nr 6, ss. 1-9, 2011.
7. Gągorowski A., Melon A.: Selected aspects of modelling mufflers for exhaust systems of vehicles. *Journal of KONES, Institute of Aviation*, vol. 20, nr 2, ss. 97-103, 2013.
8. Gągorowski A.: Badania hałasu drogowego z uwzględnieniem różnych metod obliczeniowych, w: *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, vol. 89, 2013, ss. 19-33.
9. Gągorowski A.: Oddziaływanie hałasu na środowisko na przykładzie drogowego obszaru komunikacyjnego, w: *Wybrane aspekty bezpieczeństwa w transporcie / Załęski K., Saletra N., Kowalska K. (red.), Wydawnictwo Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych*, ISBN 978-83-64636-09-7, ss. 350-361, 2015.
10. Gągorowski A.: Badania wybranych struktur tłumików układów wydechowych w środowisku avl. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*. vol. 112, 2016, ss. 101÷110.
11. Ji Z., Ma Q., Zhang Z., Application of the boundary element method to predicting acoustic performance of expansion chamber mufflers with mean flow. *Journal of Sound and Vibration*, 173, pp: 57-71, 1994.
12. Kesgin U. :Study on the design of inlet and exhaust system of a stationary internal combustion engine, *Energy Conversion and Management*, Volume 46, Issues 13–14, pp. 2258-2287, 2005.
13. Lavrentjev, J., Rämmal, H., and Tiikojä, H., “The Passive Acoustic Effect of Automotive Catalytic Converters,” *SAE Technical Paper* 2011-24-0219, 2011.
14. Lunev V. V.: *Real Gas Flows with High Velocities*. CRC Press 2009.
15. Malecki I.: *Teoria fal i układów akustycznych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1964.
16. Rathakrishnan E.: *Applied gas dynamics*. John Wiley and Sons, Singapore 2010.
17. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 540/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie poziomu dźwięku pojazdów silnikowych i zamiennych układów tłumiących oraz zmieniające dyrektywę 2007/46/WE i uchylające dyrektywę 70/157/EWG.
18. Selamet A., Lee I.J., Huff N.T.: Acoustic attenuation of hybrid silencers. *Journal of Sound and Vibration* vol. 262, pp. 509–527, 2003.
19. Smith P. H., Morrison J. C. :*The scientific design of exhaust and intake systems*, R. Bentley, 1971
20. Winterbone, D.E., Pearson, R.J., *Theory of engine manifold design, Wave action methods for IC engines*, Professional engineering publishing, 2000.

STUDY SELECTED CONNECTION IN THE EXHAUST SYSTEM WITH INCLUDING ACOUSTICAL ANALYSIS

Summary: The article presents the research of the selected type of exhaust system connection on the example of the component with a specific bending angle and connecting the exhaust manifold with the catalyst. The actual solution with an arched cylindrical structure was modeled and the influence of curvature parameters on changes in acoustic energy attenuation was determined. Modeling and simulations of acoustic gas-dynamic flows in the exhaust system were conducted using specialized computational package CFD(Computer Fluid Dynamics), namely the AVL AST. In order to quantify the degree of influence for the assumed degree of curving of the connecting element, the structure with the rectilinear element was compared (with a straight connector).

Keywords: exhaust system, collector - catalyst connection, dynamics of gas flows