

CATALYTIC CONVERTER AS AN ELEMENT OF FLOW RESISTANCE IN ENGINE EXHAUST SYSTEM

Zbigniew Żmudka, Stefan Postrzednik

Silesian University of Technology
Institute of Thermal Engineering
Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, Poland
tel.: +48 32 2371332, fax: +48 32 2372872
e-mails: zmudka@itc.polsl.pl, postrzed@itc.polsl.pl

Abstract

Conversion rate of harmful substances is the principal parameter of catalyst work in respect of ecology. However, resistance of exhaust gas flow through the catalytic converter is also essential problem, apart from its chemical efficiency because fitting the catalyst in exhaust system alters flow characteristic of this system significantly. Flow resistance generated by converter is considered as a local resistance. Resistance number of the catalyst was calculated using Darcy model. The problems have been illustrated by results of experimental researches of three way catalytic converter installed in exhaust system of spark ignition engine (type 1170A1.046) and its basic analysis. Interdependence between operating parameters of engine work and conditions of exhaust gas flow through the catalyst was determined. Inquiries into relationship between flow and structural parameters of the converters were also made. Besides, specific emissions of toxic substances were investigated in the whole operation range of the engine before and after the catalyst. Thus, changes of the emission indices within the catalyst and conversion rates of the harmful substances were evaluated.

Keywords: internal combustion engine, catalytic converter, pressure drop, local and linear flow resistance, resistance number

KONWERTOR KATALITYCZNY JAKO ELEMENT OPORU WYŁYWU SPALIN W UKŁADZIE WYLOTOWYM

Streszczenie

Przedstawiono główne problemy związane z eksploatacją konwertyorów katalitycznych, w których realizowane są procesy obróbki spalin silnikowych mające na celu ograniczenie emisji substancji szkodliwych. W tym zakresie szczególną uwagę zwrócono na efektywność termochemiczną katalizatora oraz opory przepływu, jakie stawia on na drodze wypływu spalin z silnika, ponieważ zainstalowanie konwertyora w układzie wylotowym znacznie zmienia jego charakterystykę przepływową. Opór przepływu wywołwany przez konwertyor traktowany jest jako opór miejscowy. Liczbę oporu obliczano wykorzystując model Darcy'ego. Problematykę zilustrowano wynikami badań eksperymentalnych trójfunkcyjnego katalizatora zainstalowanego w układzie wylotowym silnika o zapłonie iskrowym typu 1170A1.046. Określono wzajemne zależności pomiędzy eksploatacyjnymi parametrami pracy silnika a warunkami przepływu spalin przez katalizator oraz jego skuteczność konwersji toksycznych składników spalin.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, konwertyor katalityczny, spadek ciśnienia, miejscowy i liniowy opór przepływu, liczba oporu przepływu

1. Wprowadzenie

Znaczące rezerwy oraz istotne możliwości w zakresie poprawy efektywności pracy silników spalinowych tkwią m.in. w lepszej organizacji procesu wymiany ładunku [3]. Aby efektywnie osiągnąć zmniejszenie pracy wymiany ładunku należy zadbać o ograniczenie oporów przepływu po stronie napełniania świeżym ładunkiem, jak również po stronie wypływu spalin, gdzie istotną rolę odgrywa opór przepływu samego konwertora katalitycznego. Tak więc, instalacja katalizatora w układzie wylotowym silnika ma negatywne znaczenie dla jego pracy ze względu na wprowadzenie dodatkowego oporu, a przez to zmianę warunków przepływu spalin. Z kolei opór przepływu zależy od punktu pracy silnika jak również parametrów konstrukcyjnych samego katalizatora, w szczególności od jego porowatości oraz wielkości wolnego przekroju poprzecznego [1].

Analizowano główne problemy związane z eksploatacją konwertorów katalitycznych, w których realizowane są procesy obróbki spalin silnikowych mające na celu ograniczenie emisji substancji szkodliwych. W tym zakresie szczególną uwagę zwrócono na opory przepływu, jakie stawia on na drodze wypływu spalin z silnika, ponieważ zainstalowanie konwertora w układzie wylotowym znacznie zmienia jego charakterystykę przepływową. Konwertor katalityczny można traktować jako element oporów liniowych lub miejscowych układu wylotowego. Problematykę zilustrowano wynikami badań eksperymentalnych trójfunkcyjnego katalizatora zainstalowanego w układzie wylotowym silnika ZI. Określono wzajemne zależności pomiędzy eksploatacyjnymi parametrami pracy silnika a warunkami przepływu spalin przez konwertor katalityczny.

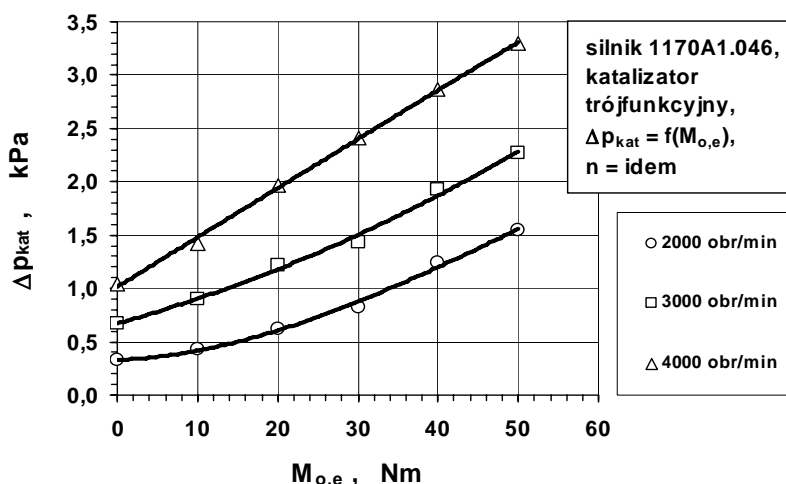
2. Katalizator jako element oporów liniowych układu wylotowego

Obiektem badań był trójfunkcyjny konwertor katalityczny zainstalowany w układzie wylotowym silnika spalinowego (typu 1170A1.046) z zapłonem iskrowym, o jednopunktowym wtrysku paliwa. Katalizator zbudowany jest z dwóch monolitycznych wkładów kordierytowych o eliptycznym przekroju. Wybrane parametry konstrukcyjne badanego katalizatora:

- materiał podłoża: podłoże ceramiczne (kordieryt),
- substancja aktywna katalitycznie: metale szlachetne – platyna, pallad, rod,
- zagęszczenie kanałów: 62 kanały/cm² (kanały o przekroju kwadratowym),
- grubość ścianki: 0,15 mm,
- przekrój wkładu roboczego: $A = 55,64 \text{ cm}^2$,
- objętość wkładów roboczych: $V = 2 \text{ wkłady po } 425,62 \text{ cm}^3 = 851,24 \text{ cm}^3$,
- ekwiwalentna średnica wewnętrzna katalizatora: $d = 83,75 \text{ mm}$,
- ekwiwalentna średnica wewnętrzna kanału: $d_k = 1,12 \text{ mm}$,
- całkowita długość wkładów roboczych: $L = 153 \text{ mm}$,
- porowatość: $\varepsilon = 0,78$.

Podstawową mierzoną wielkością charakteryzującą opór przepływu jest spadek ciśnienia Δp_{kat} spalin w obrębie konwertora, który dla badanego urządzenia przedstawiono na rysunku 1. Potwierdzono, iż rośnie on wraz ze wzrostem prędkości i obciążenia. Oczywiście, wartość spadku ciśnienia oraz jego gradient zależą od punktu pracy silnika.

W celu oceny wybranych wielkości i przeprowadzenia analizy oporów przepływu spalin przez konwertory wyznacza się średnie wartości niezbędnych parametrów spalin w ich obrębie przy wykorzystaniu średniego składu spalin [2].



Rys. 1. Spadek ciśnienia Δp_{kat} spalin w obrębie badanego katalizatora
Fig. 1. Pressure drop Δp_{kat} of exhaust gas within the catalytic converter tested

Strumień masy \dot{m}_s spalin można ogólnie zapisać następująco:

$$\dot{m}_s = A_s w_s \rho_s . \quad (1)$$

Prędkość w_s przepływu spalin przez wolny przekrój poprzeczny konwertora odnosi się także do prędkości przepływu wewnątrz pojedynczego kanału. Pole A_s wolnego przekroju poprzecznego katalizatora, przez który przepływają spaliny wynosi:

$$A_s = \varepsilon A , \quad (2)$$

gdzie: A – całkowite pole przekroju poprzecznego katalizatora (m^2),
 ε – porowatość.

Podstawiając (2) do (1) otrzymuje się:

$$\dot{m}_s = A \varepsilon w_s \rho_s , \quad (3)$$

w którym

$$\varepsilon w_s = w_{0,s} , \quad (4)$$

$w_{0,s}$ jest średnią prędkością napływową spalin w katalizatorze. Wykorzystując zależność (4) strumień spalin zapisujemy:

$$\dot{m}_s = A w_{0,s} \rho_s . \quad (5)$$

Średnią prędkość napływową $w_{0,s}$ spalin w katalizatorze obliczymy, stosując wzór (5), wg formuły:

$$w_{0,s} = \frac{\dot{n}_s M_s}{A} v_s , \quad (6)$$

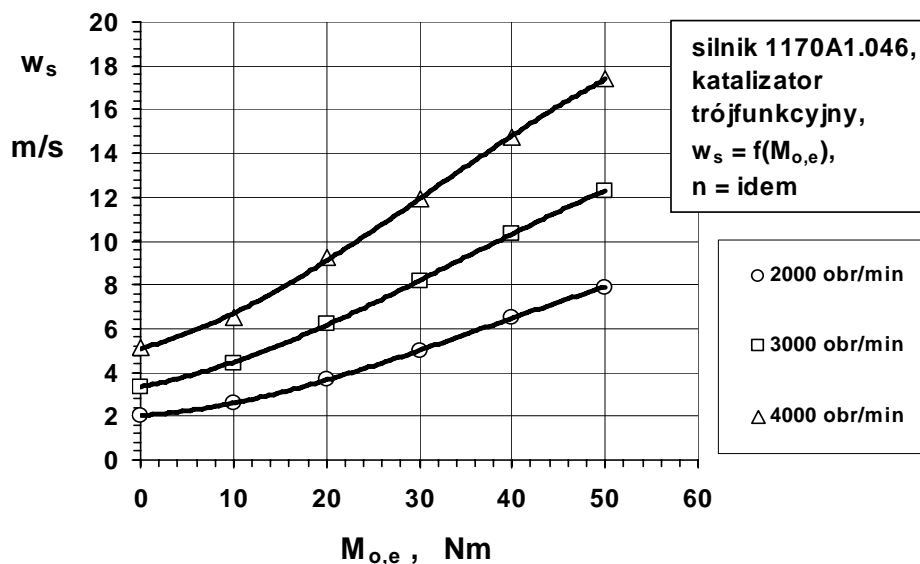
gdzie: \dot{n}_s – molowy strumień spalin, v_s – objętość właściwa spalin,

M_s – masa molowa dla średniego składu spalin wilgotnych w obrębie katalizatora.

Dla badanego układu prędkość w_s spalin wewnątrz pojedynczego kanału katalizatora przedstawiono na rysunku 2. W analizowanym obszarze pracy silnika prędkość ta zmienia się w zakresie od około 2 do 18 m/s. Potwierdzono, że prędkość spalin w kanałach konwertora jest rosnącą funkcją obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Sytuacja taka związana jest

przede wszystkim z odpowiednim wzrostem wartości strumienia spalin, gdy rośnie moment oraz prędkość obrotowa silnika.

W ujęciu modelowym zagadnienia oporów przepływu spalin, konwertyor katalityczny może być traktowany jako element oporów liniowych lub miejscowych układu wylotowego silnika. W pierwszym przypadku ujęcie zagadnienia oporów przepływu spalin przez katalizator polegać będzie na przyjęciu **liniowego układu modelowego**, z rozłożoną liniowo wzdłuż drogi przepływu spalin dyssypacją energii (liniowe opory tarcia).



Rys. 2. Prędkość w_s przepływu spalin wewnątrz pojedynczego kanału katalizatora
Fig. 2. Velocity w_s of exhaust gas flow through single cell of the catalyst

Cały wkład konwertyora katalitycznego traktuje się wtedy jako pęczek równoległych ułożonych kanałów prostych, każdy o długości L oraz zastępczej średnicy wewnętrznej d_k . Przyjąć można założenie, że spadek ciśnienia w obrębie każdego kanału jest w przybliżeniu jednakowy i równy spadkowi ciśnienia na wkładzie konwertyora.

Do opisu przepływu w obrębie każdego z kanałów można zastosować tzw. ujęcie kapilarne. W tym przypadku liniowa zmiana ciśnienia w kanale wyniesie:

$$\frac{dp}{dx} = -\lambda_k \frac{w_s^2}{2d_k} \rho_s, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (7)$$

gdzie: λ_k – liczba tarcia (oporu liniowego) w kanale konwertyora,

w_s – prędkość spalin wewnątrz pojedynczego kanału – ujęta np. za pomocą wzoru (4).

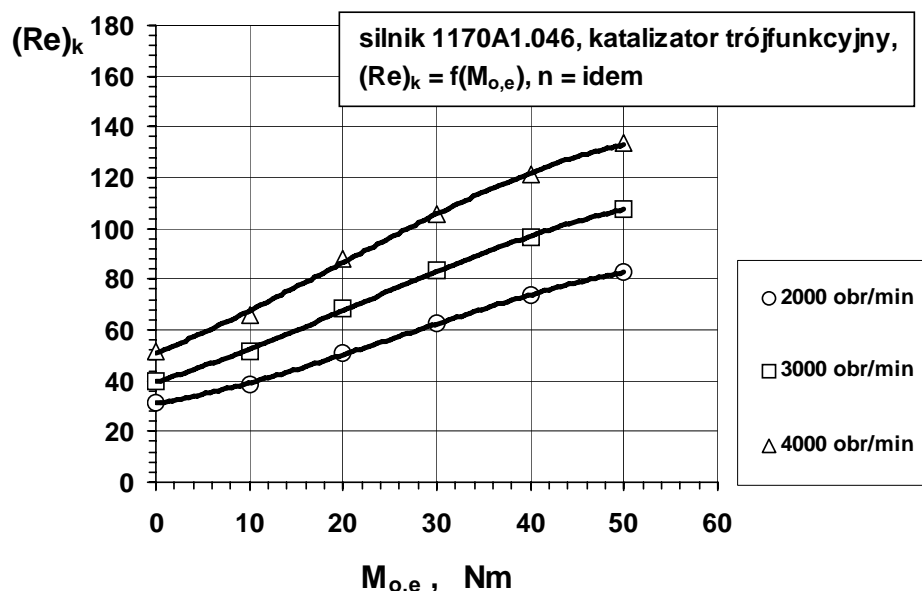
Po scałkowaniu równania (7) uzyskuje się (uśrednioną na odcinek L) zależność:

$$\Delta p_{1-2} = \left(\lambda_k \frac{L}{d_k} \right) \frac{w_s^2}{2} \rho_s. \quad (8)$$

Wyrażenie $(\lambda_k L/d_k)$ jest bezwymiarowym kryterium liniowych oporów przepływu w układzie. Liczba tarcia λ_k zależy od jakości powierzchni kanałów przepływowych, a także od warunków przepływu, charakteryzowanych za pomocą liczby Reynoldsa, a wyrażaną w tym przypadku jako:

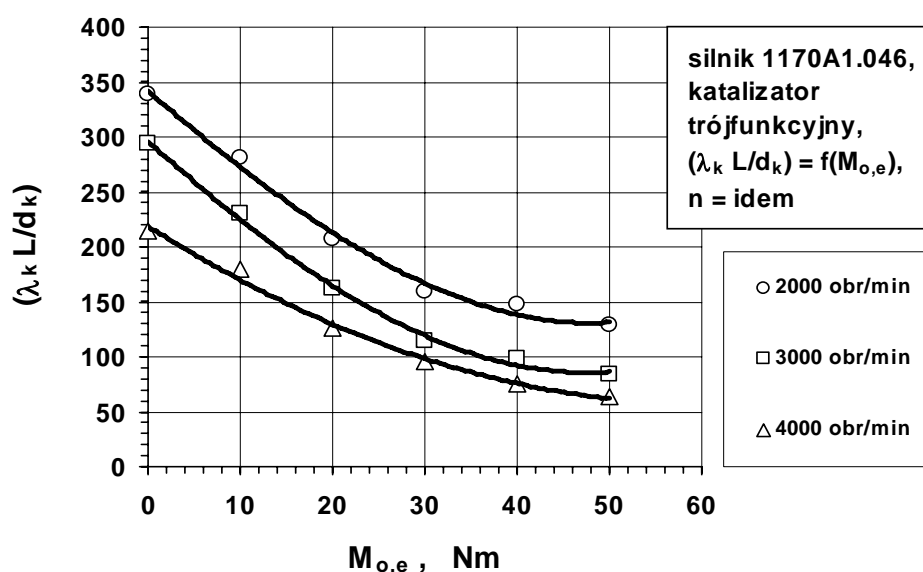
$$(\text{Re})_k = \frac{w_s d_k}{\nu_s}. \quad (9)$$

Wyznaczona według wzoru (9) liczba Reynoldsa $(Re)_k$ odnosi się do modelu traktującego opór katalizatora jako opór liniowy i dotyczy przepływu spalin w pojedynczym kanale. Kształtowanie się wartości liczby Reynoldsa $(Re)_k$ w zależności od obciążenia silnika pokazano na rysunku 3. Wynika stąd, że przepływ spalin w obrębie pojedynczego kanału leży w zakresie przepływu laminarnego, co oznacza, że chropowatość ścianek kanałów posiada mniejsze znaczenie w tym aspekcie badań.



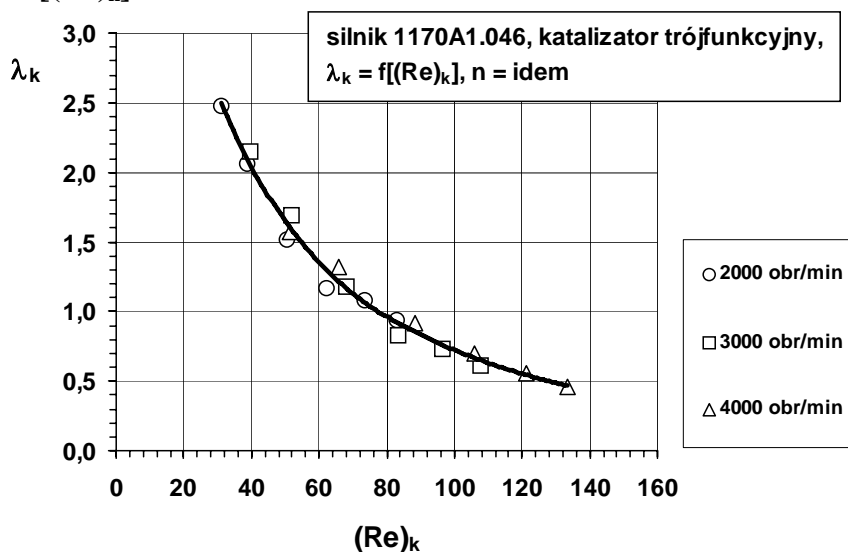
Rys. 3. Liczba Reynoldsa $(Re)_k$ przepływu spalin w pojedynczym kanale
 Fig. 3. Reynolds number $(Re)_k$ of exhaust gas flow through single cell

Dysponując wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych określić można najpierw z równania (8) wartości kryterium liniowych oporów przepływu $(\lambda_k L/d_k)$, a następnie (znając wartości wymiarów geometrycznych układu: L , d_k) wartości liczby tarcia λ_k . Wyniki obliczeń kryterium liniowych oporów przepływu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Kryterium liniowych oporów przepływu spalin $(\lambda_k L/d_k)$
 Fig. 4. Criterion of linear resistance of exhaust gas flow $(\lambda_k L/d_k)$

Zasadniczy wpływ na wartości liczby tarcia λ_k wywiera aktualna wartość liczby Reynoldsa $(Re)_k$, co z kolei zilustrowano na rysunku 5, który potwierdza, iż istnieje wyraźna zależność $\lambda_k = f[(Re)_k]$.



Rys. 5. Zależność liczby tarcia λ_k od liczby Reynoldsa $(Re)_k$ dla kanałów katalizatora
Fig. 5. Friction number λ_k versus Reynolds's number $(Re)_k$ for the catalyst cells

Uzyskane wartości liczby tarcia λ_k przewyższają wartości typowe, spotykane w instalacjach rurociągowych. Wynika to z faktu, iż względna chropowatość ścianek kanałów konwertora katalitycznego (e/d_k) jest znacznie większa od względnej chropowatości rurociągów. Jest to rezultatem konieczności rozwinięcia powierzchni reakcji (kontaktu fazy stałej i gazowej) przy bardzo małej ekwiwalentnej średnicy wewnętrznej kanału.

Względną chropowatość ścianek kanałów konwertora katalitycznego (e/d_k) można obliczyć wykorzystując wyznaczoną uprzednio liczbę tarcia λ_k oraz liczbę Reynoldsa $(Re)_k$. Posłużyć się można w tym celu np. zależnością Colebrooka–White'a [2]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_k}} = 2 \lg \left[\frac{(Re)_k \sqrt{\lambda_k}}{2,51} + \frac{3,71}{\left(\frac{e}{d_k} \right)} \right]. \quad (10)$$

Dla badanego konwertora, stosując przedstawioną powyżej metodę, uzyskano wartość względnej chropowatość ścianek kanałów $(e/d_k) = (0,09 - 0,20)$.

3. Katalizator jako element oporów miejscowych układu wylotowego

Innym, bardziej uproszczonym podejściem jest model, w którym opór przepływu, jaki wywołany jest przez katalizator traktuje się jako **opór miejscowy**. Jest to podejście szczególnie praktyczne w przypadku, gdy utrudniony jest dostęp do szczegółowych danych konstrukcyjnych wkładu roboczego konwertora, a niezbędna jest analiza oporów przepływu w układzie wylotowym.

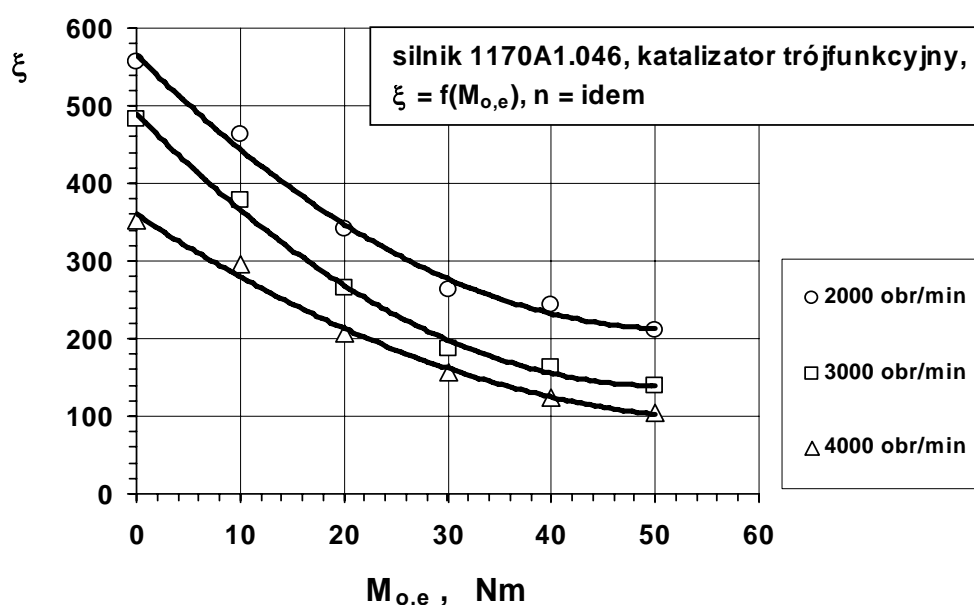
Wykorzystać można w tym celu model Darcy'ego [2]:

$$\Delta p = \xi \frac{w_{0,s}^2}{2 v_s}, \quad (11)$$

z którego oblicza się liczbę ξ oporu katalizatora według wzoru:

$$\xi = \frac{2 v_s \Delta p_{\text{kat}}}{w_{0,s}^2} \quad (12)$$

Charakterystyki obciążeniowe liczby ξ oporu badanego trójfunkcyjnego katalizatora zainstalowanego w układzie wylotowym silnika typu 1170A1.046, dla wybranych prędkości obrotowych przedstawiono na rysunku 6. Ogólnie zależność liczby ξ oporu zarówno od momentu obrotowego jak i prędkości obrotowej silnika jest funkcją malejącą. Taka sytuacja, zgodnie z formułą (12), jest uwarunkowana większym wpływem wzrostu napływowej prędkości $w_{0,s}$ (wzór (6)) spalin na liczbę oporu ξ konwertora, aniżeli przyrost spadku ciśnienia Δp_{kat} oraz objętości właściwej v_s spalin. W badanym obszarze pracy silnika wartość liczby ξ oporu katalizatora zmienia się w stosunkowo szerokim zakresie, od 100 do około 560.



Rys. 6. Liczba oporu ξ badanego katalizatora
 Fig. 6. Resistance number ξ of the catalyst tested

Następnie, średni kinematyczny współczynnik lepkości ν spalin w obrębie katalizatora oblicza się według wzoru:

$$\nu(T) = \nu_0 \left(\frac{T_{sr}}{T_0} \right)^{\frac{7}{4}}, \quad (13)$$

gdzie: $\nu_0 = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $T_0 = 273 \text{ K}$

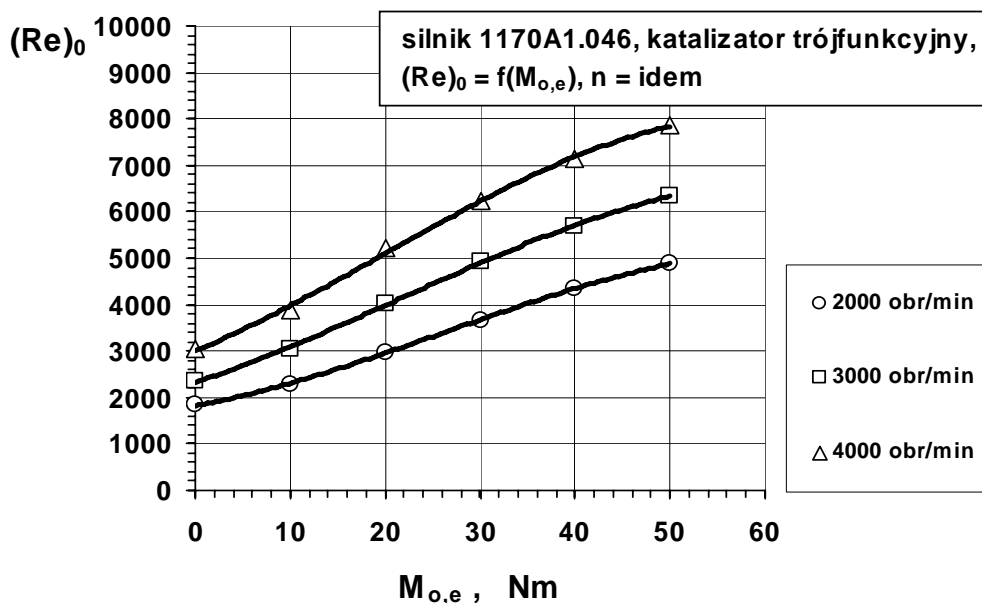
Napływowa liczba Reynoldsa $(Re)_0$ wyliczana jest według zależności:

$$(Re)_0 = \frac{w_{0,s} d}{\nu}, \quad (14)$$

gdzie: d – ekwiwalentna średnica wewnętrzna katalizatora (m).

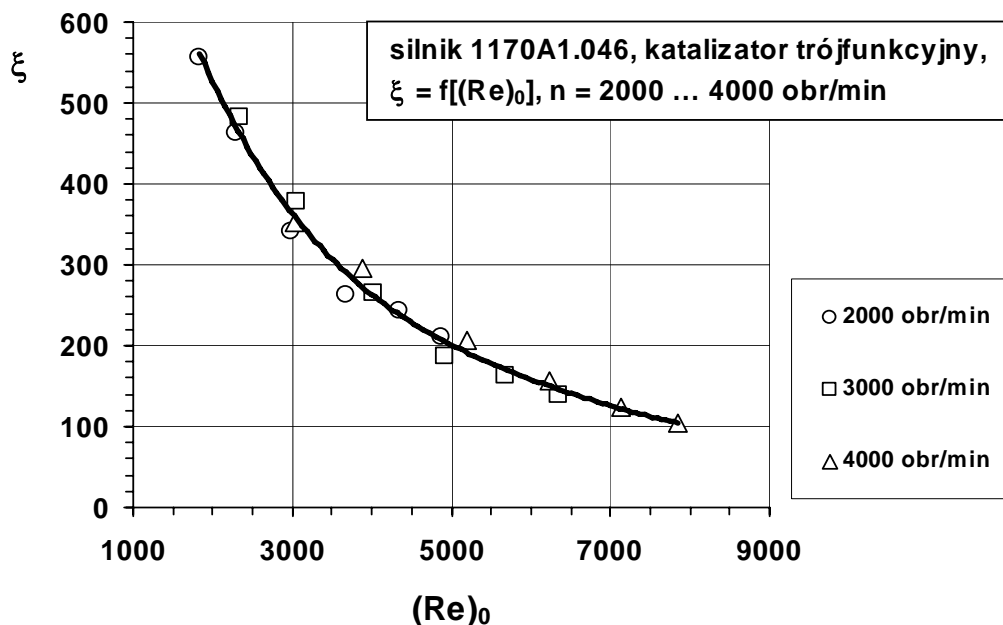
Wyznaczona według wzoru (14) napływowa liczba Reynoldsa $(Re)_0$ odnosi się wyłącznie do przyjętego modelu, traktującego opór katalizatora jako opór miejscowy, a sam pakiet wewnętrzny konwertora jako tzw. „czarną skrzynkę”, tzn. nie analizuje się wewnętrznej

struktury kanałów przepływowych. Liczba ta dotyczy przekroju położonego bezpośrednio przed wkładem roboczym konwertora, stąd nazwa – napływowa liczba Reynoldsa. Dla spalin przepływających przez konwertyor liczba $(Re)_0$ rośnie prawie liniowo w zależności od momentu obrotowego silnika (Rys. 7) i zawiera się w przedziale od około 2000 do około 8000. Zależność liczby Reynoldsa od obciążenia również jest funkcją rosnącą.



Rys. 7. Liczba Reynoldsa $(Re)_0$ przepływu spalin przez konwertyor traktowany jako opór miejscowy
 Fig. 7. Reynolds's number $(Re)_0$ of exhaust gas flow through the converter tested

Wzajemną zależność pomiędzy liczbą oporu ξ katalizatora a napływową liczbą Reynoldsa przepływu spalin przedstawiono na rysunku 8. Liczba oporu ξ maleje wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa. Jednakże w takim ujęciu obserwuje się nieznaczny wpływ prędkości obrotowej silnika na kształtowanie się zależności $\xi = f[(Re)_0]$.



Rys. 8. Zależność liczby oporu ξ katalizatora od napływowej liczby Reynoldsa przepływu spalin
 Fig. 8. Resistance number ξ of the catalyst versus Reynolds's number of exhaust gas flow

Dodatkowo, zależność:

$$(\text{Re})_k = (\text{Re})_0 \frac{d_k}{d \varepsilon}, \quad (15)$$

(gdzie: ε – porowatość wkładu roboczego katalizatora) przedstawia prostą relację pomiędzy napływową liczbą Reynoldsa $(\text{Re})_0$, charakterystyczną dla ujęcia, w którym katalizator traktuje się jako element oporu miejscowego oraz liczbą Reynoldsa $(\text{Re})_k$ odnoszącą się do przepływu spalin w obrębie pojedynczych kanałów, przy przyjęciu modelu oporów liniowych.

Tak więc, oprócz parametrów eksploatacyjnych silnika oraz spalin opory przepływu zależą ściśle także od parametrów konstrukcyjnych konwerterów. W tym względzie istotne znaczenie ma porowatość wkładów roboczych (monolitycznego podłoża). Porowatość wyznaczano dwoma metodami [6]:

- dokonując pomiarów geometrii kanałów i wkładu roboczego katalizatorów (porowatość zewnętrzna),
- opracowaną metodą termodynamiczną (porowatość całkowita).

Można generalnie zauważyć, iż niższe wartości liczby oporu ξ posiadają katalizatory o wyższej porowatości ε [7]. Jednakże niezbędna jest głębsza analiza termodynamiki zjawisk przepływowych zachodzących w obrębie katalizatorów, ponieważ o liczbie oporu będzie ostatecznie decydowała nie tylko porowatość, lecz również ich inne parametry konstrukcyjne (np. wolny przekrój poprzeczny czy też zagęszczenie pola powierzchni styku fazy stałej i gazowej) oraz eksploatacyjne własności spalin. Problem ten będzie przedmiotem kolejnych analiz.

4. Podsumowanie

Przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych trójfunkcyjnego konwertora katalitycznego zainstalowanego w układzie wylotowym silnika o zapłonie iskrowym (typu 1170A1.046), w zakresie oporów przepływu spalin. Opór przepływu spalin przez katalizator jest istotnym zjawiskiem dla eksploatacji silnika, ponieważ determinuje pracę wymiany ładunku a przez to również zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń. Przeprowadzone badania wykazały wzajemne zależności pomiędzy eksploatacyjnymi parametrami pracy silnika oraz przepływowymi i konstrukcyjnymi parametrami konwerterów.

Uogólniając zagadnienie należy zauważyć, że opory przepływu spalin w obrębie konwertora katalitycznego można analizować wykorzystując model oporów liniowych, jak również model oporów miejscowych. Ten pierwszy należy uznać za bardziej ogólny, gdyż pozwala uwzględnić wymiary geometryczne (L , d_k) układu przepływowego. Katalizator traktowany jest wówczas jako układ przepływowy z liniowo rozłożonymi oporami wzdłuż drogi przepływu spalin, przy uwzględnieniu równoległego rozplywu spalin na poszczególne kanały wypełnienia katalizatora. Zagadnienie to również będzie przedmiotem następnych bardziej szczegółowych opracowań.

Literatura

- [1] Maus, W., *Jumping the SULEV Hurdle with "Cascades"*. Auto Technology 2, 2001.
- [2] Postrzednik, S., *Termodynamika zjawisk przepływowych*, Pol. Śl. Gliwice 1991.
- [3] Postrzednik, S., Żmudka, Z., *Improvement of IC Engine Work by Modification of its Thermodynamic Cycle*. Proceedings of ECOS'2002, 15th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Berlin 2002.

- [4] Żmudka, Z, Postrzednik, S., *Characteristics and Diminishing of Gaseous Emission from Diesel Engine*. International Journal of Applied Thermodynamics. International Centre for Applied Thermodynamics. Vol. 3 (No. 1), pp. 43-48, March 2000.
- [5] Żmudka, Z., Postrzednik, S., Ciesiołkiewicz, A., *Evaluation of work parameters of oxidation catalysts in diesel engine exhaust system*. Journal of KONES – Internal Combustion Engines. Vol. 10, No. 3 – 4. 2003.
- [6] Postrzednik, S., Żmudka, Z., *Solid Material Porosity and the Method of its Determination* (paper 4-10-1018). Proceedings of the 29th International Symposium on Combustion. Hokkaido University. Sapporo 2002.
- [7] Żmudka, Z., Postrzednik, S., Ciesiołkiewicz, A., *Operation Aspects of Automotive Catalytic Converter Application*. Proceedings of ECOS'2004, 17th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Guanajuato, Mexico, 2004.