

KATARZYNA SINDERA^{1*}, MARZENA IWANISZYN¹, MATEUSZ KORPYŚ¹,
MIKOŁAJ SUWAK¹, TADEUSZ KLESZCZ¹, ANDRZEJ KOŁODZIEJ^{1,2},
ANNA GANCARCZYK¹

OPORY PRZEPIYWU STRUKTUR OPŁYWOWYCH

¹Instytut Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

²Politechnika Opolska, Wydz. Budownictwa i Architektury, ul. Katowicka 48, 45-061

Opole

W pracy przedstawiono wyniki badań oporów przepływu dla nowego rodzaju nośników katalitycznych - struktur opływowych. Wypełnienia te są strukturami krótkokanałowymi (krótkimi monolitami) o różnych kształtach przekroju poprzecznego kanałów. Innowacyjność projektu polega na uformowaniu przekroju ścianek kanałów struktur na podobieństwo profilu skrzydła samolotu. Przedstawiono wpływ długości struktury i kształtu przekroju poprzecznego jej kanałów na opory przepływu oraz porównano wyniki badań z wartościami dla monolitu i złoża usypanego.

Słowa kluczowe: struktury opływowe, struktury krótkokanałowe, opory przepływu

The paper presents flow resistance of a new type of catalytic carriers - streamlined structures. They are short-channel structures (short monoliths) of various channel cross-sectional shape. The innovation of the design is channel wall similar to the airfoil profile. The influence of the structure length and the channel cross-sectional shape on flow resistance is presented. The results are also compared with the values for monolith and packed bed.

Keywords: streamlined structures, short-channel structures, flow resistance

1. WPROWADZENIE

Reaktory z wypełnieniem monolitycznym są najczęściej stosowanymi urządzeniami w procesach związanych z ochroną powietrza atmosferycznego [1]. Podobne aparaty instalowane są w samochodach w celu oczyszczania spalin

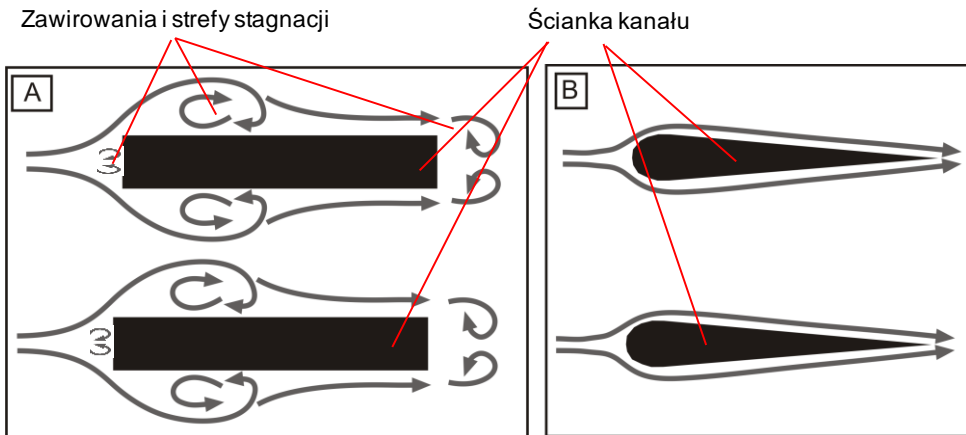
z cząstek pyłów, tlenków azotu i CO [2]. Monolity składają się z wielu długich, równoległych kanałów o różnym kształcie przekroju poprzecznego (np. kwadratowym, okrągłym lub sinusoidalnym). Na powierzchni kanałów naniesione są katalizatory reakcji chemicznych. Pożądaną cechą wypełnienia katalitycznego jest duża powierzchnia właściwa, S_v , umożliwiająca osadzenie dużej ilości fazy aktywnej; dla monolitów osiąga ona $4000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ [3]. Pozytywną cechą tych struktur są niewielkie opory przepływu; ich wadą jest niewielka intensywność wymiany ciepła i masy pomiędzy powierzchnią nośnika a przepływającym płynem.

Jedną z możliwości udoskonalenia monolitycznych wypełnień katalitycznych wynika z teorii rozwijającego się przepływu laminarnego [4]. Na wlocie do kanału monolitu profile prędkości, temperatury i stężenia są płaskie. Transport ciepła i pędu zachodzi w tym rejonie przez cienką warstwę przyścienną i jest stosunkowo intensywny. Jest to tzw. przepływ laminarny rozwijający się. Siły tarcia lepkiego powodują w głębi kanału formowanie się parabolicznych profili prędkości płynu: największą prędkość płyn osiąga w osi kanału, na jego ściankach prędkość jest równa zero. Podobnie kształtują się profile temperatury i stężenia reagentów w wyniku przewodzenia ciepła i dyfuzji molekuł reagentów. Taki przepływ nosi nazwę rozwiniętego przepływu laminarnego; intensywność transportu ciepła i masy zmniejsza się w wyniku zwiększenia grubości warstwy przyściennej w porównaniu do przepływu rozwijającego się. Wypełnienie monolityczne cechuje się małymi wartościami współczynników transportu ciepła i masy ze względu na fakt, że rozwinięty przepływ laminarny występuje na przeważającej długości kanału. Znaczne skrócenie długości kanałów, L , zwiększające udział rozwijającego się przepływu laminarnego w wypełnieniu katalitycznym, prowadzi do wzrostu wartości liczb Nu/Sh struktury. Idea ta została opracowana przez Kołodzieja i wsp. [5–6]. Nowy rodzaj geometrii został określony jako struktura krótkokanałowa. Skróceniu długości kanałów towarzyszy wzrost jednostkowych oporów przepływu wypełnienia $\Delta P/L$, jest on jednak akceptowalny, biorąc pod uwagę pozostałe korzyści. Zwiększone wartości współczynników transportu ciepła i masy struktur krótkokanałowych, w porównaniu do długich monolitów, zostały potwierdzone za pomocą badań eksperymentalnych opisanych w pracach [7–12].

W przytoczonych powyżej pracach opisano również wpływ kształtu przekroju poprzecznego kanałów na opory przepływu i właściwości transportowe struktur krótkokanałowych. Zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w pracy [12],

najbardziej korzystnymi oporami przepływu oraz wartościami współczynników transportu ciepła cechuje się nośnik o sześciokątnym, a następnie kwadratowym i trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów.

Kolejna możliwość modyfikacji kształtu nośnika jest związana ze zmniejszeniem inercyjnych oporów przepływu. Występowanie oporów lepkich wynika z działania wspomnianych już sił tarcia lepkiego. Opory inercyjne powstają, gdy cząsteczki płynu napotykają na swojej drodze przeszkodę, która spowoduje zmianę toru ich ruchu. Przykładowo, zawirowania i strefy stagnacji tworzą się podczas przepływu przez kanał monolitów oraz struktur krótkokanałowych, których ścianki charakteryzują się prostokątnym kształtem przekroju poprzecznego. Przepływ ten przedstawiono na Rys. 1A. Zmniejszeniu zawirowań sprzyja wprowadzenie do geometrii elementów o opływowym kształcie, np. wzorowanym na profilu skrzydła samolotu [13]. Nadanie przekrojowi poprzecznemu ścianek kanałów kształtu zbliżonego do profilu skrzydła samolotu powinno wpłynąć na zmniejszenie inercyjnych oporów przepływu, w porównaniu do struktury o prostych krawędziach (zob. Rys. 1B).



Rys. 1. Przepływ przez kanał struktury krótkokanałowej o: A - prostych, B - opływowych krawędziach [13]

Fig. 1. Flow through the channel of a short-channel structure with: A - sharp, B - streamlined edges [13]

W niniejszej pracy opisano badania oporów przepływu struktur krótkokanałowych o opływowym kształcie przekroju poprzecznego ścianek kanałów, o różnych kształtach przekrojów poprzecznych kanałów. Geometrie te w dalszej części pracy będą określane jako "struktury opływowe".

2. METODYKA POMIAROWA

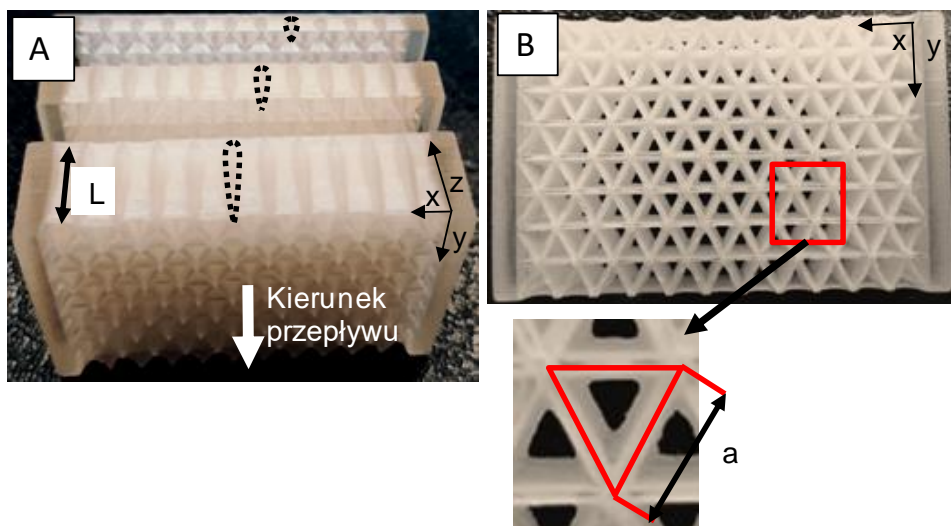
2.1. TESTOWANE STRUKTURY

Badaniom eksperymentalnym poddano struktury opływowe o kwadratowym, sześciokątnym i trójkątnym przekroju poprzecznym kanałów, o długościach, L , 3, 6 i 12 mm. Nośniki scharakteryzowano w Tabeli 1.

Tabela 1. Badane struktury - rodzaje i wymiary charakterystyczne

Table 1. Structures studied - types and characteristic dimensions

Struktura	Kształt przekroju poprzecznego kanałów	L , mm	ε	S_v , $m^2 \cdot m^{-3}$
SKw3	kwadrat	3	0,708	924,81
SKw6		6	0,708	867,47
SKw12		12	0,708	847,74
SHex3	sześciokąt foremny	3	0,708	925,29
SHex6		6	0,708	867,61
SHex12		12	0,708	848,36
STri3	trójkąt równoboczny	3	0,533	1387,01
STri6		6	0,533	1294,71
STri12		12	0,533	1262,74



Rys. 2. Zdjęcia przykładowych testowanych struktur: A - widok od góry, B - widok od tyłu

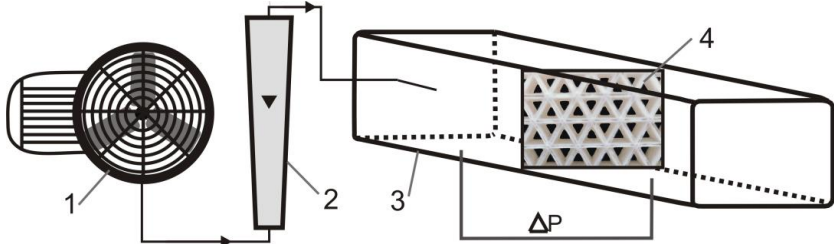
Fig. 2. Examples of tested structures: A - top view, B - back view

Zdjęcia przykładowych struktur zaprezentowano na Rys. 2, linią przerywaną zaznaczono na fotografii opływowy kształt przekroju poprzecznego ścianek kanałów. Symbolem a na Rys. 2, oznaczono długość boku kanału struktury (mierzonego wzdłuż osi ścianki kanału). Niezależnie od kształtu przekroju poprzecznego kanałów, dla wszystkich struktur $a = 4$ mm. Nośniki wytworzono w Katedrze Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji Politechniki Wrocławskiej, metodą "polyjet" na urządzeniu Eden 350 (Objet) z tworzywa sztucznego FullCure.

2.2. APARATURA POMIAROWA

Badania oporów przepływu przeprowadzono dla każdej ze struktur oddzielnie, za pomocą aparatury pomiarowej, której schemat przedstawiono na Rys. 3. W czasie eksperymentów prędkość powietrza w_0 regulowana była w zakresie $\sim 0,7 - 11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zastosowano reaktor o prostokątnym kształcie przekroju poprzecznego, o wymiarach części testowej 45×30 mm. Badane struktury umieszczano prostopadle do kierunku przepływu powietrza. Opory przepływu mierzono za

pomocą elektronicznego przetwornika różnicy ciśnień oraz mikromanometru Recknagla.

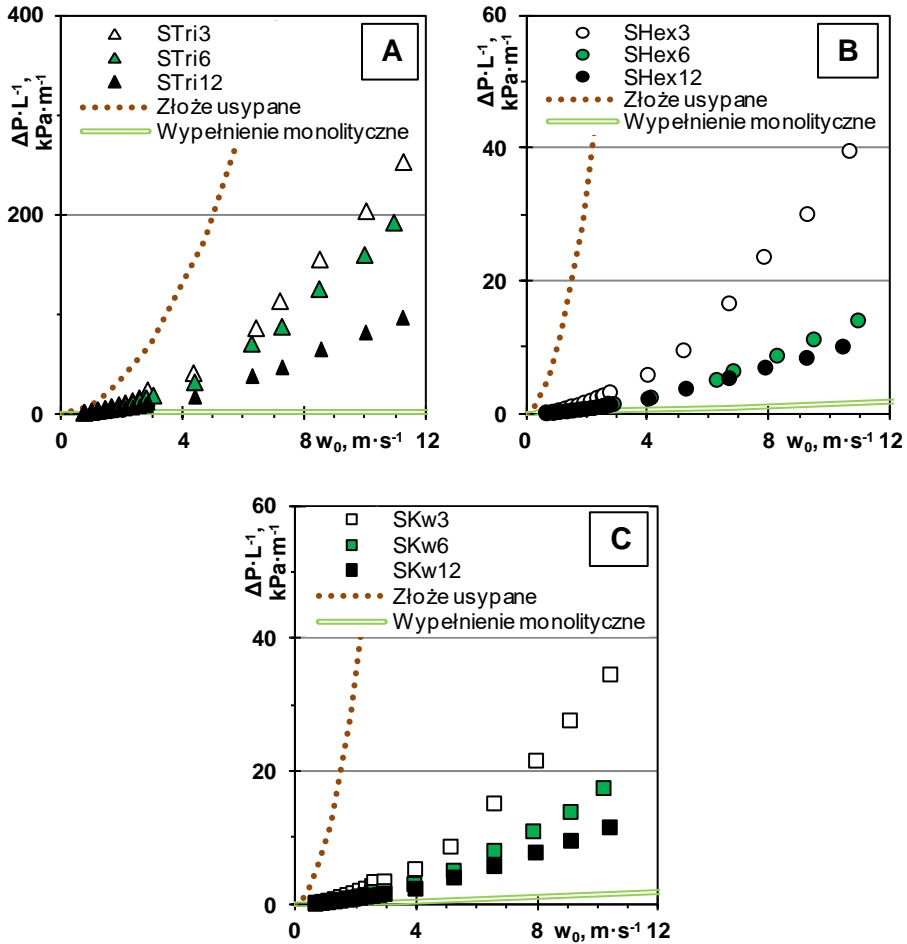


Rys. 3. Aparatura pomiarowa: 1 - sprężarka, 2 - rotametr, 3 - reaktor, 4 - testowana struktura

Fig. 3. Experimental setup: 1 - blower, 2 - rorameter, 3 - reactor, 4 - tested structure

3. WYNIKI

Wielkość oporów przepływu struktur krótkokanałowych zależy od długości nośników oraz kształtu przekroju poprzecznego ich kanałów [7,14]. Czynniki te wpływają również na spadki ciśnień struktur opływowych, co przedstawiono na Rys. 4. Jednostkowe opory przepływu testowanych struktur zazwyczaj maleją ze wzrostem długości wypełnień. Wyjątek stanowią struktury o sześciokątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów o długości 6 i 12 mm, o zbliżonych do siebie oporach przepływu (Rys. 4). Wpływ kształtu przekroju poprzecznego kanału jest najbardziej widoczny dla struktur o kształcie trójkątnym. W przypadku struktur o tej samej długości spadki ciśnienia dla wypełnień o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów są znacznie większe, niż dla pozostałych testowanych struktur. Różnice te rosną ze wzrostem prędkości pomiarowej, w_0 , i wynikają prawdopodobnie ze znacząco mniejszej porowatości (wolnej objętości) struktur o kształcie trójkątnym w porównaniu do pozostałych wypełnień (Tabela 1). Spadki ciśnienia dla struktur o sześciokątnym i kwadratowym kształcie przekroju są porównywalne w całym zakresie prędkości przepływu.



Rys. 4. Wpływ długości struktury na opory przepływu dla struktur o przekroju poprzecznym:

A - trójkątnym, B - sześciokątnym, C - kwadratowym

Fig. 4. The influence of structure length on flow resistance for structures of: A - triangular, B - hexagonal, C - square cross-sectional shape

Otrzymane wyniki porównano z wartościami dla konwencjonalnych wypełnień: złoże usypanego oraz monolitu. Dla złoża usypanego zastosowano korelację Erguna [15] (równanie 1), a dla wypełnienia monolitycznego równanie Hawthorna [16] (równanie 2) oraz Darcy-Weisbacha (równanie 3):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{\eta \cdot w_0 \cdot (1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon^3} + 1,75 \cdot \frac{\rho \cdot w_0^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{D_p \cdot \varepsilon^3} \quad (1)$$

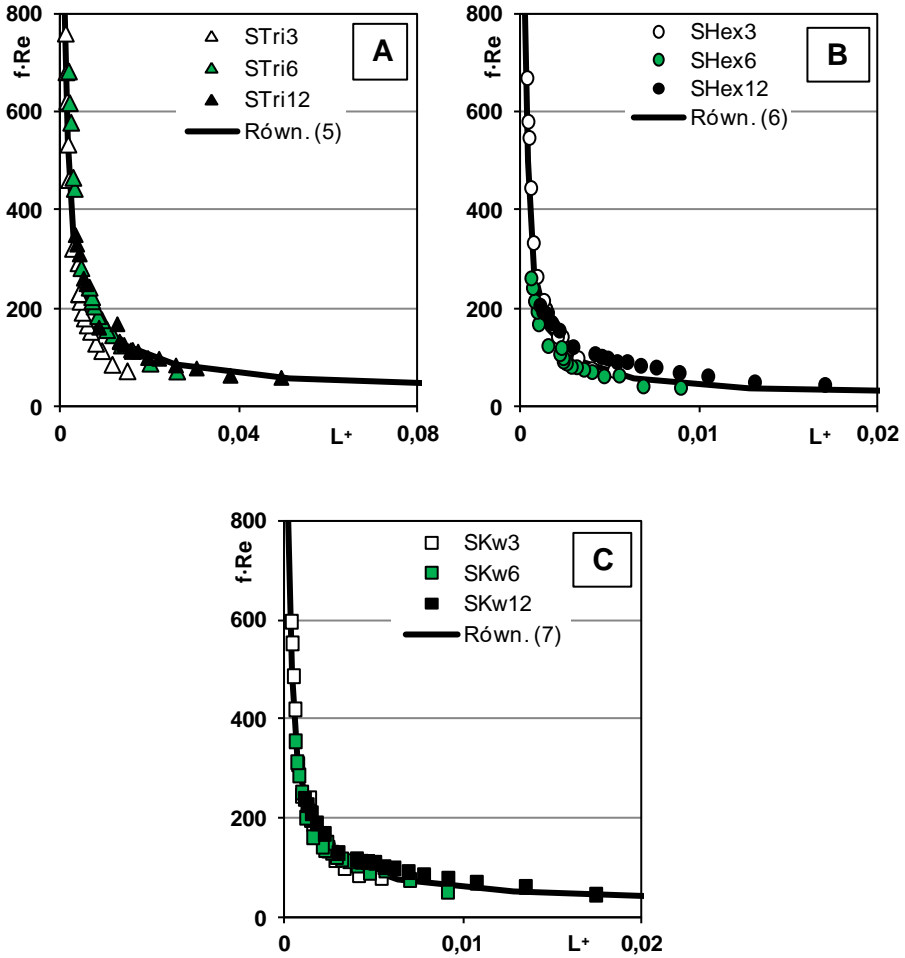
$$(f \cdot Re) = (f \cdot Re)_{fd} \left(1 + \frac{0,045}{L^+}\right)^{0,5} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 2f \frac{\rho w_0^2}{\varepsilon^2 d} \quad (3)$$

Zastosowano wypełnienia konwencjonalne o powierzchni właściwej zbliżonej do testowanych struktur opływowych: monolit 50 cpsi ($S_v = 917 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, $\varepsilon = 0,68$ [17]) o kanałach o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego, $L = 0,2 \text{ m}$, oraz złożo usypane o średnicy ziaren 3 mm ($S_v = 1220 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, $\varepsilon = 0,39$ [18]). W całym testowanym zakresie pomiarowym prędkości w_0 opory przepływu dla struktur opływowych są mniejsze niż dla złoża usypanego. Dla $w_0 < 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ spadki ciśnień struktur opływowych są zbliżone do monolitu, dla większych prędkości gazu testowane struktury cechują się większymi oporami przepływu. Równania literaturowe dla wypełnień monolitycznych i krótkokanałowych, często przedstawiają opory przepływu jako iloczyn współczynnika oporu hydrodynamicznego Fanninga i liczby Reynoldsa ($f \cdot Re$) w funkcji L^+ :

$$f \cdot Re = (f \cdot Re)_{fd} + b \cdot (L^+)^c \quad (4)$$

Wyniki eksperymentalne skorelowano stosując tą samą zależność. Wartości dla struktur o tym samym kształcie przekroju poprzecznego kanałów nakładają się na siebie (Rys. 5). Skorelowano je więc za pomocą wspólnego równania. Wartości współczynników b i c oraz $(f \cdot Re)_{fd}$ przedstawiono w Tabeli 2. Równania te dobrze opisują wyniki eksperymentalne, średni błąd względny nie przekracza 19 %.



Rys. 5. ($f \cdot Re$) vs. L^+ dla struktur opływowych o: A - trójkątnym B - sześciokątnym, C - kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów
 Fig. 5. ($f \cdot Re$) vs. L^+ for streamlined structures of: A - triangular, B - hexagonal, C - square channel cross-sectional shape

Tabela 2. Stałe $(f \cdot Re)_{fd}$, b i c w równaniu (4) oraz wartości średnich błędów względnych
 Table 2. Constants $(f \cdot Re)_{fd}$, b i c in equation (4) and average relative errors

Kształt przekroju poprzecznego struktury opływowej	$(f \cdot Re)_{fd}$	b	c	Średni błąd względny, e_y
trójkąt	13,333	5,1845	-0,7176	14%
sześciokąt	15,054	0,5140	-0,8748	19 %
kwadrat	14,227	1,4207	-0,7439	10 %

WNIOSKI

- Nowy rodzaj nośników katalitycznych - tzw. struktury opływowe charakteryzują się znacznie mniejszymi oporami przepływu w porównaniu do złoża usypanego oraz zbliżonymi lub nieco większymi spadkami ciśnień do wypełnienia monolitycznego.
- Na opory przepływu struktur opływowych wpływa długość struktury oraz kształt przekroju poprzecznego jej kanałów. Jednostkowe spadki ciśnień tego rodzaju struktur zazwyczaj maleją ze wzrostem długości struktury. Widoczny jest również wpływ kształtu przekroju poprzecznego kanałów: struktury o trójkątnym kształcie cechują się większymi oporami przepływu niż struktury o kształcie sześciokątnym i kwadratowym, które wykazują podobne wartości $\Delta P/L$ w całym zakresie prędkości w_0 .

OZNACZENIA – SYMBOLS

d	- średnica hydrauliczna kanału, m, = $4\epsilon \cdot S_v^{-1}$ hydraulic channel diameter
D_p	- średnica ziarna, m grain diameter
e_y	- błąd względny = $\frac{ y_{exp} - y_{kor} \cdot 100\%}{y_{exp}}$ relative error
f	- współczynnik oporów Fanninga Fanning friction factor
L	- długość kanału, m channel length

L^+	- bezwymiarowa długość kanału dla przepływu rozwijającego się hydrodynamicznie, = $L \cdot Re^{-1} \cdot d^{-1}$ dimensionless length for the hydrodynamic entrance region
ΔP	- spadek ciśnienia, Pa pressure loss
Re	- liczba Reynoldsa, = $w_0 d \cdot \rho \cdot \eta^{-1} \cdot \varepsilon^{-1}$ Reynolds number
S_v	- powierzchnia właściwa, $m^2 \cdot m^{-3}$ specific surface area
w_0	- prędkość średnia płynu (liczona na przekrój pustego aparatu), $m \cdot s^{-1}$ superficial fluid velocity
ε	- porowatość porosity
η	- dynamiczny współczynnik lepkości, Pa·s dynamic viscosity
ρ	- gęstość, $kg \cdot m^{-3}$ density

INDEKSY DOLNE I GÓRNE – SUBSCRIPTS AND SUPERSSCRIPTS

exp	- wartość eksperymentalna experimental value
fd	- wartość dla przepływu laminarnego rozwiniętego value for developed laminar flow
kor	- wartość obliczona na bazie równania korelacyjnego value calculated based on the correlation equation

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE – REFERENCES

- [1] Avila P., Montes M., Miro E. E., 2005. Monolithic reactors for environmental applications - A review on preparation technologies. Chem. Eng. J., 109(1-3). DOI: 10.1016/j.cej.2005.02.025.
- [2] Heck R.M., Farrauto R.J., 2001. Automobile exhaust catalysts. Appl. Catal., A., 221(1-2), 443-457. DOI:10.1016/S0926-860X(01)00818-3.
- [3] Kołodziej A., Łojewska J., 2005. Optimization of structured catalyst carriers for VOC combustion. Catal. Today., 105(3-4), 378-384. DOI:10.1016/j.cattod.2005.06.029.
- [4] Shah R.K., London A.L., 1978. Laminar flow forced convection in ducts, Academic Press, New York. DOI:10.1016/B978-0-12-020051-1.50015-2.
- [5] Kołodziej A., Łojewska J., 2007. Short-channel structured reactor for catalytic combustion: Design and evaluation. Chem Eng Process., 46(7), 637-648. DOI:10.1016/j.cep.2006.08.009.

-
- [6] Kołodziej A., Łojewska J., Ochońska J., Łojewski T., 2011. Short-channel structured reactor: Experiments versus previous theoretical design. *Chem Eng Process.*, 50(8), 869-876. DOI:10.1016/j.cep.2011.05.003.
- [7] Iwaniszyn M., Ochońska J., Gancarczyk A., Jodłowski P. J., Knapik A., Łojewska J., Janowska-Renkas E., Kołodziej A., 2013. Short-Channel Structured Reactor as a Catalytic Afterburner, *Top. Catal.*, 56(1-8), 273-278. DOI:10.1007/s11244-013-9966-8.
- [8] Iwaniszyn M., Ochońska J., Jodłowski P. J., Łojewska J., Kołodziej A., 2012. Very short monoliths of triangular cross-sectional channel shape for fast catalytic reactions, *Przemysł Chemiczny* 91(7), 1435-1438.
- [9] Kołodziej A., Łojewska J., Iwaniszyn M., Jodłowski P. J., Ochońska J., Rogulska A., Gancarczyk A., Matuszek-Chmurowska A., 2012. Mass transfer and flow resistance for sinusoidal short-channel catalytic internals, *Przemysł Chemiczny*, 91(10), 2074-2078.
- [10] Sinderka K., Iwaniszyn M., Jodłowski P. J., 2021. Momentum Transfer in Short-Channel Structures of Hexagonal Channel Cross-Section Shape: Experiments vs. CFD, *Catalysts*, 11(9). DOI:10.3390/catal11091036.
- [11] Kołodziej A., Łojewska J., Łojewski T., Iwaniszyn M., 2011. Short-channel structures of triangular cross-section, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 54(15-16), 3291-3295. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.03.058.
- [12] Iwaniszyn M., Jodłowski P. J., Sinderka K., Gancarczyk A., Korpyś M., Jedrzejczyk R.J., Kołodziej A., 2021. Entrance effects on forced convective heat transfer in laminar flow through short hexagonal channels: Experimental and CFD study. *Chem. Eng. J.*, 405, 18. DOI:10.1016/j.cej.2020.126635.
- [13] Schlichting H., 1979. *Boundary-Layer Theory*, 7th edition, New York, McGraw-Hill
- [14] Iwaniszyn M., Piątek M., Gancarczyk A., Jodłowski P. J., Łojewska J., Kołodziej A., 2017. Flow resistance and heat transfer in short channels of metallic monoliths: Experiments versus CFD. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 109, 778-785. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.019.
- [15] Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns, *Chem. Eng. Prog.* 48(2), 89-94.
- [16] Hawthorn R.D., 1974. Afterburner catalysis-effects of heat and mass transfer between gas and catalyst surface, *AIChE Symp. Ser.*, 428-438.
- [17] Williams J.L., 2001. Monolith structures, materials, properties and uses. *Catal. Today.*, 69(1-4), 3-9. DOI:10.1016/s0920-5861(01)00348-0.
- [18] Saroha A.K., Nigam K.D.P., 1996. Trickle bed reactors, *Rev. Chem. Eng.*, 12(3-4), 207-347. DOI:10.1515/revce.1996.12.3-4.207.

KATARZYNA SINDERA, MARZENA IWANISZYN, MATEUSZ KORPYŚ,
MIKOŁAJ SUWAK, TADEUSZ KLESZCZ, ANDRZEJ KOŁODZIEJ, ANNA GANCARCZYK

FLOW RESISTANCE OF STREAMLINED STRUCTURES

Monolithic reactors are the most frequently used atmospheric air protection devices, e.g. in cars as catalytic car converters. Monolithic carriers have many advantages, such as low flow resistance and large specific surface area. However, their heat/mass transport coefficients (Nusselt/Sherwood numbers) are low compared to other catalytic carriers, e.g. packed bed. This is the reason why research is being carried out on improving the transport properties of monoliths (increasing their Nu/Sh numbers) by modifying their geometry. One of the possibilities of such modifications is to significantly shorten the length of the channels. Monoliths are characterized by low values of heat and mass transport coefficients because the majority of the length of the channels has developed laminar flow. Significantly shortening the length of the channels increases the share of developing laminar flow. In this flow, heat/mass exchange occurs more efficiently because energy/mass is exchanged through a thinner boundary layer than in the case of developed flow. Significantly shortened monoliths are called short-channel structures. Another possibility of modifying the short-channel structure geometry is to change the shape of the cross-section of the channels. The most favorable flow resistance and heat transport coefficient values are characterized by a carrier with a hexagonal, then square and triangular shape of the channel cross-section. Geometry modifications may also focus on increasing the share of viscous flow resistances compared to inertial ones. When the fluid flows through the reactor, two types of resistance are generated: viscous (related to the action of viscous friction forces) and inertial (related to the occurrence of vortices and stagnation zones). In the case of short-channel structures, vortices and stagnation zones are observed both in the inlet and outlet parts of the carrier channel. The introduction of streamlined elements into the carrier geometry should positively reduce inertial flow resistance. Therefore, in the research described in this paper, carriers, short-channel structures with walls having a streamlined shape modeled on the profile of an aircraft wing, were examined. Structures manufactured in three length variants: 3, 6 and 12 mm, with three different channel cross-section shapes: square, hexagonal and triangular. The tests were carried out in the range of

interstitial gas velocity $w_0 \sim 0,7 - 11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The influence of the structure length and cross-sectional shape on pressure drops was investigated. Additionally, the experimental results were compared with the values for conventional catalytic carriers: monolith and packed bed. The flow resistance of wing structures usually decreases as the length of the structure increases. The exception are structures with a hexagonal cross-section of channels with a length of 6 and 12 mm, in which the generated flow resistances are similar to each other. The influence of the shape of the channel cross-section is most visible for triangular structures. For structures of the same length, the pressure drops for structures with a triangular cross-sectional shape of the channels are higher than for the other structures. These differences increase with increasing flow velocity. Pressure drops for structures with hexagonal and square cross-section shapes are comparable over the entire w_0 range. In the entire tested velocity range, the flow resistance for streamlined structures is lower compared to the packed bed. For $w_0 < 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the flow resistance of the streamlined structures is close to the monolith, for higher gas velocities the tested structures are characterized by higher pressure drop.

Received: 26.10.2023

Accepted: 1.12.2023