

BARBARA WORSZTYNOWICZ*

WSTĘPNE BADANIA PRZEPIYWOWE MODELI MONOLITU REAKTORA KATALITYCZNEGO

PRELIMINARY FLOW INVESTIGATION OF A SUPPORTS OF THE CATALYTIC CONVERTER

Streszczenie

W artykule przedstawiono nową koncepcję budowy monolitów reaktora katalitycznego. Zostały wykonane dwa modele rdzenia różniące się geometrią, na których przeprowadzono badania wizualizacyjne. Celem wizualizacji była analiza zjawisk dynamicznych zachodzących w modelach.

Słowa kluczowe: monolit reaktora katalitycznego, zjawiska dynamiczne, turbulencje, częstotliwość własna

Abstract

The paper presents a new concept of construction of catalytic converter supports. Two models of supports varying in geometry were made on which visualization was carried out. The purpose of the visualization was analysis of the dynamic phenomena occurring on the models.

Keywords: catalytic converter support, dynamic phenomena, turbulence, natural frequency

*Mgr inż. Barbara Worsztynowicz, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

1. Wstęp

Historia reaktorów katalitycznych stosowanych w układach wylotowych silników spalinowych sięga lat 60. i 70. XX w. Od początku podłoże reaktora miało postać monolitu ceramicznego lub metalowego, składającego się z wielu kanalików o małym przekroju, równoległych do osi przepływu spalin. Monolity w przekroju poprzecznym przypominały strukturę plastra miodu. Do dziś koncepcja budowy monolitu (nośnika) nie uległa zmianie. Oczywiście, technologia wykonania została udoskonalona. Rdzenie mają coraz większą liczbę kanalików przypadającą na jednostkę powierzchni przekroju (cps), a dzielące je ścianki są znacznie cieńsze. Jednak uwaga konstruktorów skupiona jest na zjawiskach chemicznych, a nie fizycznych. Cały czas pracuje się nad składem substancji tworzących warstwę pośrednią, a przede wszystkim nad substancjami (metalami szlachetnymi) aktywnymi katalitycznie.

Normy dotyczące emisji spalin są coraz bardziej rygorystyczne, dlatego układy oczyszczania spalin stają się bardzo rozbudowane. Wynika to z faktu, że reaktory katalityczne pracują prawidłowo w wąskich zakresach wartości takich parametrów, jak temperatura czy współczynnik nadmiaru powietrza. Natomiast warunki pracy silnika są zmienne, uzależnione od zmian obciążenia, prędkości obrotowej. [1–3]. Ponadto reaktor stanowi element dodatkowego, niekorzystnego oporu w układzie wylotowym silnika, ponieważ przepływ spalin przez strukturę typu „plaster miodu” ma charakter laminarny [5, 6]. Właściwym krokiem w związku z tym wydają się poszukiwania rozwiązań, w których nie byłoby ograniczenia przepływu i wykorzystano by zjawiska dynamiczne pochodzące od silnika do ułatwienia reakcji katalizy.

W artykule przedstawiono koncepcję budowy monolitu reaktora katalitycznego o geometrii umożliwiającej dynamiczny przepływ czynnika, a także wyniki wizualizacji przepływu przez modele monolitu wg koncepcji.

2. Budowa modeli monolitu reaktora katalitycznego

Monolit reaktora katalitycznego w pierwszym wykonaniu tworzą: przegroda środkowa ze ścianami bocznymi oraz usytuowane pomiędzy tymi ścianami, po obu stronach przegrody środkowej, powtarzalne elementy środkowe i boczne. Elementy środkowe i boczne są jednakowej wysokości, równej wysokości ścian bocznych.

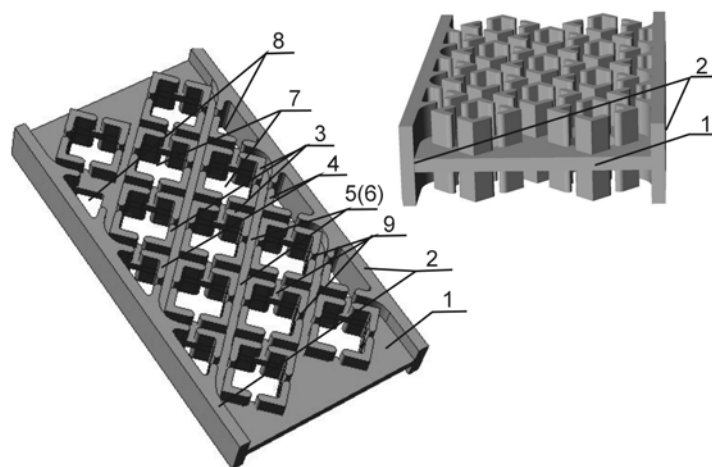
Przegroda środkowa (1) łączy ściany boczne (2) wzdłuż całej długości nośnika, tworząc z nimi w przekroju poprzecznym kształt symetrycznej litery H. Elementy środkowe (3) i boczne (4) monolitu usytuowane są symetrycznie względem siebie i przegrody środkowej (1), a w linii prostopadłej do osi przepływu (wlot–wylot) mają ustawienie rzędowe. Po każdej stronie przegrody środkowej (1) powstaje układ składający się z siedmiu rzędów, w których znajduje się jedenaście elementów środkowych (3) i sześć elementów bocznych (4). Pierwszy, trzeci, piąty i siódmy rząd tworzą dwa elementy środkowe (3). Drugi, czwarty i szósty rząd tworzą jeden element środkowy (3) i dwa elementy boczne (4).

Elementy środkowe (3) są trwale połączone z przegrodą środkową (1), a elementy boczne (4) z przegrodą środkową (1) i odpowiednią ze ścian bocznych (2), a wysokość ścian wszystkich elementów jest równa wysokości ścian bocznych (2).

W widoku prostopadłym do środkowej przegrody (1) elementy środkowe (3) mają obrysy kwadratów, które są ustawione jednymi z przekątnych równoległe do osi przepływu (wlot–wylot). Ustawienie takie powoduje, że kąt pomiędzy ścianami tych elementów a odpowiednią ze ścian bocznych (2) wynosi 45° . Boczne elementy (4) są połówkami elementów środkowych (3) i mają obrysy prostokątnych trójkątów równoramiennych. Boczne elementy (4) są usytuowane symetrycznie względem elementów środkowych (3) w taki sposób, że ich przeciwprostokątne podstawy trójkątów pokrywają się z odpowiednią ze ścian bocznych.

Elementy środkowe (3) i boczne (4) kształtują dwustronny system – dolny (6) i górny (5) – sieci krzyżujących się przepływowych kanałów. Kanały te są otwarte w osi przepływu wlot–wylot.

Zarówno elementy środkowe (3), jak i boczne (4) mają przestrzenie wewnętrzne tworzące, odpowiednio, komory środkowe (7) lub boczne (8). Komory te – (7) i (8) – stanowią wspólną obustronnie otwartą przestrzeń dla usytuowanych symetrycznie po przeciwnych stronach przegrody środkowej (1) elementów środkowych (3) bądź bocznych (4). Wszystkie komory – (7) i (8) – mają połączenia z przylegającymi do nich odcinkami sieci kanałów (5) i (6) przez szczeliny (9) usytuowane w środku długości każdej z czterech ścian środkowych elementów (3) oraz dwóch prostopadłych ścianach bocznych elementów (4). Przy czym wysokości tych szczelin (9) są równe wysokościami ścian elementów (3) i (4) (rys. 1) [4].



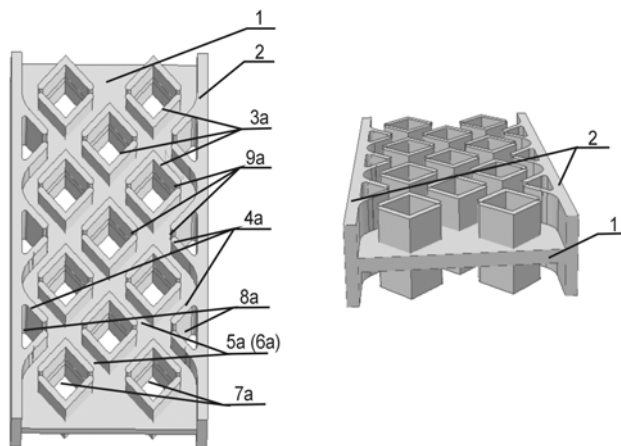
Rys. 1. Budowa monolitu reaktora według pierwszego wykonania
Fig. 1. Construction of catalytic converter supports according to first realization

Monolit reaktora według drugiego wykonania nie różni się pod względem koncepcji budowy od wersji pierwszej. Również tworzy go przegroda środkowa ze ścianami bocznymi oraz usytuowane pomiędzy tymi ścianami, po obu stronach przegrody środkowej, powtarzalne elementy środkowe i boczne. Elementy środkowe i boczne są jednakowej wysokości, równej wysokości ścian bocznych.

Elementy środkowe (3a) i boczne (4a) są usytuowane symetrycznie względem siebie i przegrody środkowej (1), a w linii prostopadłej do osi przepływu (wlot–wylot) mają ustawienie rzędowe. Po każdej stronie przegrody środkowej (1) powstaje układ składający

się z siedmiu rzędów, w których znajduje się jedenastcie elementów środkowych (3a) i sześć elementów bocznych (4a). Pierwszy, trzeci, piąty i siódmy rząd tworzą dwa elementy środkowe (3a). Drugi, czwarty i szósty rząd tworzą jeden element środkowy (3a) i dwa elementy boczne (4a).

Pierwszą cechą różniącą rdzeń wg drugiego wykonania w stosunku do rdzenia wg pierwszego wykonania jest usytuowanie szczelin (9a) w komorach środkowych (7a) i bocznych (8a). Szczeliny (9a) są usytuowane w narożach komór, a nie w połowie długości ścian. Przy czym komory środkowe (7a) mają po dwie szczeliny (9a), a komory boczne (8a) po jednej szczelinie (9a), usytuowane w tych narożach, przez które przechodzą przekątne prostopadłe do osi przepływu wlot-wylot. Narożne szczeliny (9a) łączą komory środkowe (7a) i boczne (8a) z siecią górną (5a) i dolną (6a) przepływowych kanałów.



Rys. 2. Budowa monolitu reaktora według drugiego wykonania
Fig. 2. Construction of catalytic converter supports according to second realization

Cechą odróżniającą drugie wykonanie rdzenia jest również niewspółosiowy układ odcinków kanałów w sieci górnej (5a) i dolnej (6a). Kolejne odcinki kanałów sieci (5a) i (6a) mają osie przesunięte względem siebie o połowę szerokości kanału (rys. 2).

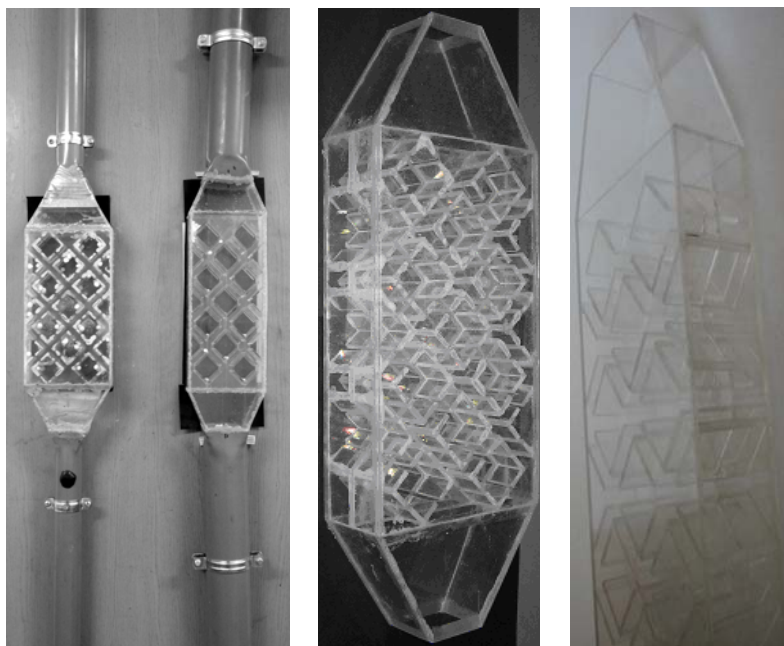
3. Badania przepływowe modeli reaktora katalitycznego

Badania obejmowały wizualizację przepływu czynnika roboczego przez modele reaktora. Przeprowadzenie wizualizacji miało kilka celów. Przede wszystkim sprawdzenie, na ile potwierdzą się założenia teoretyczne dotyczące zjawisk dynamicznych wywołanych przepływem przez reaktor. Ponadto dokonanie konfrontacji różnic w konstrukcji rdzenia w pierwszym i drugim wykonaniu. A ostatecznie podjęcie decyzji o wyborze jednej z wersji wykonania do dalszych badań.

W tym celu zrealizowano dwa modele z tworzywa sztucznego, o odmiennej geometrii, umożliwiające obserwację zjawisk zachodzących wewnątrz reaktora. Na wejściach do modeli zostały umieszczone ceramiczne sitka. Następnie każdy z nich połączono z przewodami doprowadzającym i odprowadzającym oraz umieszczono pionowo na stanowisku

badawczym, przy czym przewód doprowadzający znajdował się w dolnej części układu (rys. 3).

Badania polegały na przepuszczaniu przez wypełnione wodą modele reaktora pęcherzyków powietrza. Powietrze było tłoczone przez przewód doprowadzający. Źródło zasilania stanowiła sprężarka tłokowa (bez zbiornika wyrównawczego) pracująca z częstotliwością 12,5 Hz. Strumień tłoczonego powietrza wynosił $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$. Umieszczone na wejściach do modeli sitka miały powodować rozdrobnienie pęcherzyków powietrza i ich równomierne doprowadzanie na całej powierzchni wejściowej.



Rys. 3. Modele fizyczne monolitów reaktora oraz stanowisko badawcze
Fig. 3. Physical models of the catalyst support and the test stand

Po napełnieniu modeli wodą, której słup miał ok. 500 mm, i uruchomieniu źródła zasilania powietrza, prowadzona była rejestracja cyfrowa przebiegu zachodzących zjawisk, z częstotliwością 30 klatek na sekundę.

4. Wyniki badań i ich analiza

4.1. Model I

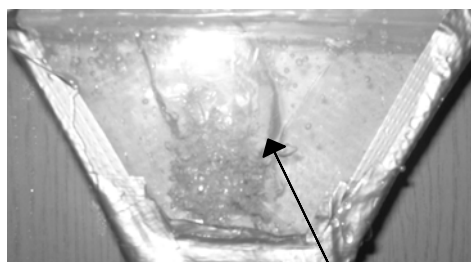
Pulsujący strumień powietrza, tłoczony do układu bezpośrednio ze sprężarki, wpływał do środowiska wodnego mającego o 3 rzędy większą gęstość. Na wejściu do modelu natrafiał na element dzielący w postaci ceramicznego sitka z ok. 850 otworkami o średnicy 1 mm. Po przejściu przez sitko w dyfuzorze następowało łączenie się podzielonych wcześniej strumieni i powstawały duże pęcherze o różnym kształcie i wielkości. Ponadto

w dyfuzorze dochodziło do intensywnych zawirowań. Strumień pęcherzy powietrza, dopływając do rdzenia modelu, był dzielony na dwie części przez przegrodę środkową. Następnie każda z nich na kolejne trzy części poprzez komory znajdujące się w pierwszym rzędzie, w proporcjach: 50% – przestrzeń pomiędzy komorami, i dwa razy 25% – przestrzenie między każdą z komór a ścianą boczną. Strumień środkowy natrafiał na wierzchołek komory środkowej drugiego rzędu i następował jego kolejny podział na dwie części. I tak strumienie trafiały do układu ośmiu symetrycznych kanałów, czterech w sieci dolnej i czterech w sieci górnej, w których następował intensywny przepływ, oraz przylegających do nich komór o ograniczonym przepływie. Po przejściu przez rdzeń strumienie powietrza wypływały do konfuzora w postaci dużej ilości drobnych pęcherzyków, podlegających intensywnym zawirowaniom.

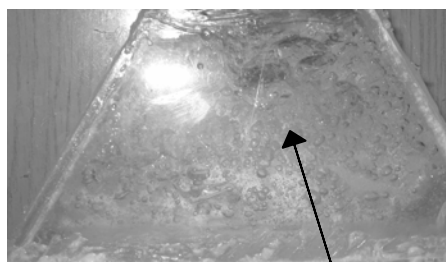
Stabilizacja warunków przepływu następowała po czasie, kiedy strumień dotarł do ostatnich elementów układu. Obserwacje przepływu pozwoliły stwierdzić, że czoło zaburzenia fali ciśnienia przemieszcza się równolegle przez sieć kanałów oraz przez komory środkowe i boczne. Układ pulsuje z jedną stałą częstotliwością.

Strumienie sprężonego powietrza, przepływając przez rdzeń, każdorazowo po pokonaniu odcinka kanału przylegającego do jednej ze ścian komory natrafiały na skrzyżowanie dwóch kanałów, gdzie dochodziło do zderzania i przenikania się strumieni. Następowo mieszanie wody z powietrzem, czego obrazem były białe smugi. Przepływowi czynnika w kanałach towarzyszyły intensywne turbulencje i tarcie.

Wszystkie komory mają szczeliny w połowie długości każdej ze ścian, które stanowią połączenie z przylegającymi do nich odcinkami kanałów. Umożliwiają one ograniczony przepływ pęcherzyków powietrza przez komory, co w połączeniu z pulsacją układu powodowało dużą burzliwość w komorach. Wpływające przez szczeliny pojedyncze pęcherze wykonywały w przestrzeni komór intensywny ruch i ulegały rozbijaniu na wiele bardzo drobnych pęcherzyków. Pulsacje w komorach wywierały wpływ na charakter strumienia przepływającego kanałami, następowało przenoszenie impulsów ciśnienia do sieci kanałów.

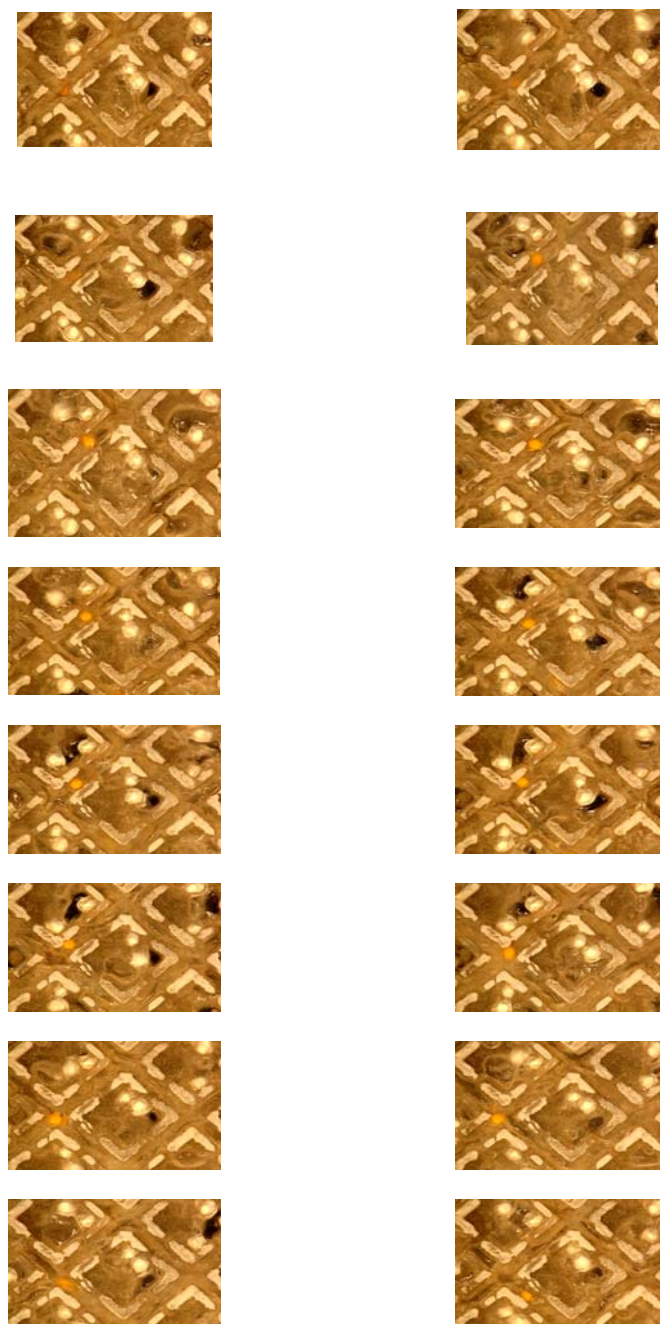


pęcherz powietrza o dużej wielkości



duża liczba pęcherzyków niewielkich rozmiarów

Rys. 4. Obraz zjawisk zachodzących na wejściu i wyjściu z reaktora
Fig. 4. Images of phenomena at the inlet and outlet of the catalytic converter



Rys. 5. Obraz przepływu w modelu reaktora rejestrowany z częstotliwością 30 Hz
Fig. 5. Images of flow on the model of the catalytic converter registered with frequency 30 Hz

Na wejściu do modelu reaktora, pomimo zastosowanego sitka, pęcherzyki łączyły się, tworząc pęcherze o dużych rozmiarach, które w miarę przesuwania się w górę, zgodnie z kierunkiem przepływu, ulegały rozbijaniu. Na wyjściu z rdzenia, w konfuzorze można było obserwować już tylko pęcherzyki o niewielkich rozmiarach. Różnica wielkości była dwóch–trzech rzędów. Rozbijanie pęcherzy następowo na skutek synergizmu dwóch zjawisk, pulsacji ze stałą częstotliwością zachodzących w całej objętości modelu i nakładaniu się strumieni na skrzyżowaniach kanałów (rys. 4).

W trakcie obserwacji przebiegu zachodzących zjawisk wprowadzono do układu dodatkowy element w postaci kulek z tworzywa sztucznego o średnicy ok. 6 mm. Zabieg taki pozwolił na uwidocznienie powstającego w kanałach modelu efektu częściowej (niezupełnej) fali stojącej. Kulki przemieszczały się ruchem chaotycznym zarówno w kierunku zgodnym z przepływem, jak i w przeciwnym. Kiedy znajdowały się na wysokości szczelin, często dochodziło do powstania częściowej (niezupełnej) fali stojącej. Wówczas kulka balansowała przez jakiś czas w zakresie pojedynczego kanalika, ograniczonego po obu stronach skrzyżowaniami (rys. 5).

W przedstawionej analizie wyraźnie widać wzajemne oddziaływanie i powiązanie zjawisk zachodzących w komorach i w sieci kanałów.

4.2. Model II

Ze względu na podobną geometrię obu modeli strumień pęcherzy powietrza w modelu wg drugiego wykonania podlegał takim samym podziałom na wejściu do modelu. Następnie również przemieszczał się w układzie ośmiu symetrycznych kanałów, czterech w sieci dolnej i czterech w sieci górnej, w których następował intensywny przepływ, oraz przylegających do nich komór o ograniczonym przepływie. Stabilizacja warunków przepływu następowała po czasie, kiedy strumień dotarł do ostatnich elementów układu.

Na wejściu do modelu było umieszczone sitko z ok. 960 otworkami. Strumienie po przejściu przez sitko łączyły się, tworząc pęcherze o dużych rozmiarach i zmiennym kształcie. Na skutek intensywnych turbulencji w dyfuzorze dochodziło tam do mieszania strumieni i rozbijania pęcherzy do mniejszych rozmiarów. Dlatego większość napływających do rdzenia strumieni składała się z małych pęcherzyków. Następstwem było bardzo dobre wymieszanie powietrza z wodą, co dało się obserwować w całym przepływie przez kanały jako białe smugi. Wpływające do konfuzora pęcherze były rozdrobnione i nadal podlegały bardzo intensywnym zawirowaniom. Rozbijanie pęcherzy już w dyfuzorze wynika z faktu, że cały układ pulsuje z jedną, stałą częstotliwością, a pulsacje rozchodzą się we wszystkich kierunkach.

Komory mają szczeliny w narożach, przez które przechodzą przekątne prostopadłe do osi przepływu wlot–wylot, tak że połączenie komór z kanałami następuje na skrzyżowaniach kanałów. Takie usytuowanie szczelin w połączeniu z pionowym umieszczeniem modelu na stanowisku badawczym powodowało tylko częściowe wypełnienie komór wodą. Jednocześnie dało się zaobserwować, że im komory znajdują się dalej od wlotu do rdzenia, tym wypełnienie powierzchni komór jest większe (rys. 6). Dodatkowo komory boczne stanowiące połowki komór środkowych charakteryzowały się lepszym wypełnieniem w stosunku do komór środkowych znajdujących się w tych samych rzędach.

Strugi przepływające kanałami były wprawione w ruch turbulentny. Każdorazowo po pokonaniu odcinka kanału przyległego do ściany komory natrafiały na skrzyżowanie

dwóch kanałów, gdzie przenikały się i ulegały intensywnemu mieszaniu. Zjawiska zachodzące na skrzyżowaniach oddziaływały na procesy w komorach. Pojawiające się w wyniku zderzeń strug na skrzyżowaniach impulsy ciśnienia przemieszczały się przez szczeliny boczne do komór. Trafiające do komór środkowych z dwóch stron impulsy nakładały się, powodując intensywny ruch.



Rys. 6. Obraz przepływu w modelu reaktora
Fig. 6. Images of flow on the model of the catalytic converter

Podobnie jak w przypadku modelu wg pierwszego wykonania, w tym również pulsacje przemieszczały się w kierunku przepływu i powrotnym. W kanałach pojawiały się zjawiska niepełnej (częściowej) fali stojącej, jednak z mniejszym nasileniem niż odbywało się to w poprzednim modelu. Użyte kulki z tworzywa sztucznego były wpychane do komór przez impulsy ciśnienia na skrzyżowaniach. Tam osiadały na dnie, dociskane naporem wody.

Przedstawiona analiza wskazuje na wzajemne oddziaływanie i powiązanie zjawisk zachodzących w komorach i w sieci kanałów.

5. Podsumowanie

Zaobserwowane zjawiska wydają się potwierdzać założenia teoretyczne będące podstawą nowej konstrukcji. W celu lepszego wyjaśnienia zachodzących w modelach zjawisk prowadzone są dalsze prace o charakterze podstawowym, obejmujące również komputerowe symulacje przepływu.

Kolejny etap prac powinien obejmować przygotowanie prototypów ceramicznych, dobrane do nich warstw katalizujących i przebadanie w warunkach rzeczywistych.

Literatura

- [1] Kruczyński S., *Trójfunkcyjne reaktory katalityczne*, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, Warszawa–Radom 2004.
- [2] Merkiś J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [3] Rokosch U., *Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD*, WKiŁ, Warszawa 2007.
- [4] Worsztynowicz B., *A new concept of a catalyst support for internal combustion engines*, Quarterly Mechanics, Vol. 26 /2007, Wydawnictwa AGH, Kraków 2007.
- [5] Żmudka Z., Postrzednik S., Ciesiołkiewicz A., *Eksploatacyjne parametry pracy konwertyorów katalitycznych*, KONMOT – AUTOPROGRES 2004, Czasopismo Techniczne, z. 6-M/2004, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
- [6] Żmudka Z., Postrzednik S., *Konwertyor katalityczny jako element oporu wpływu spalin w układzie wylotowym*, Journal of KONES, Vol. 13, No. 1, Warszawa 2006.