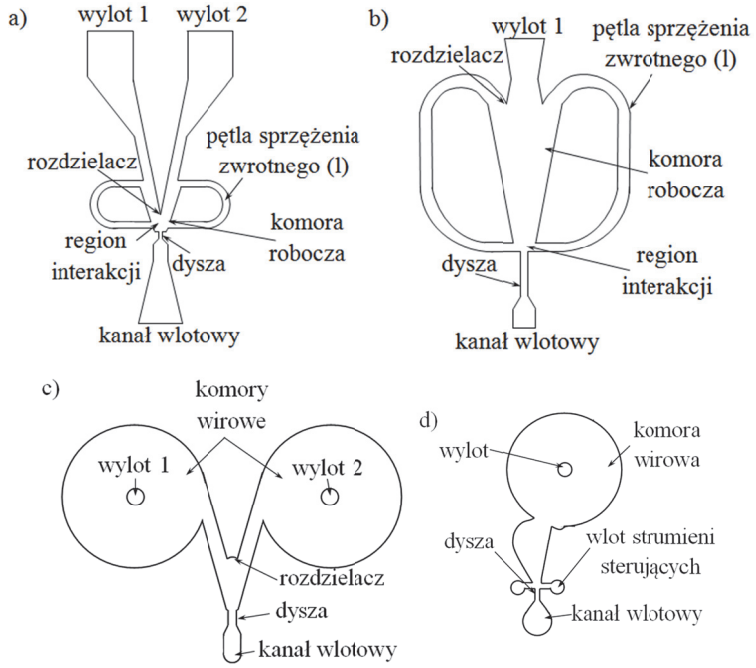
OSCYLATORY PŁYNOWE – WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI I PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA

Emil Smyk[1], Michał Stopel[2]

1. WSTĘP

Efekt Coandy to zjawisko przylegania strugi płynu (cieczy lub gazu) do powierzchni, przy której dany płyn przepływa [Lalli i in. 2010]. Zjawisko to jest wykorzystywane w konstrukcji wielu urządzeń jak na przykład zawory płynowe [Tesař i in. 2014a, b], chwytaki pneumatyczne [Lien i Davis 2008] czy właśnie oscylatory płynowe [Peszyński i in. 2016].

Oscylatory płynowe (ang. fluidic oscillator) to urządzenia, które przy ciągłym sygnale wejściowym (struga płynu o stałym masowym natężeniu przepływu) generują zmienny sygnał wyjściowy o stałej częstotliwości. Oscylatory nie zawierają przy tym żadnych ruchowych części, a ich działanie opiera się na wykorzystaniu fizycznych własności płynu dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu ich (oscylatorów) geometrii. Przykładowe oscylatory płynowe oraz ich najważniejsze elementy przedstawiono na rysunku 1.



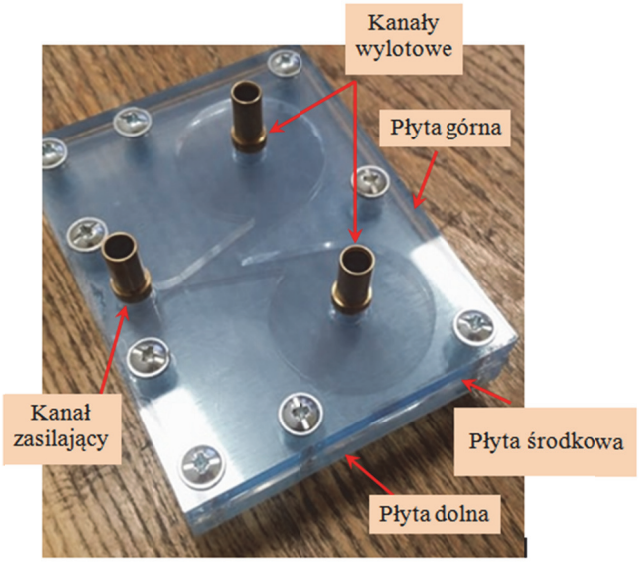
Rys. 1. Elementy charakterystyczne przykładowych oscylatorów płynowych: oscylator z pętlą sprzężenia zwrotnego z a) dwoma wyjściami, b) jednym wyjściem oraz wirowy oscylator Karmana z c) dwoma komorami wirowymi, d) z jedną komorą wirową (opracowanie własne)

[1] Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Mechatroniki i Maszyn Roboczych, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: emil.smyk@utp.edu.pl
[2] Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Metod Komputerowych, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: michal.stopel@utp.edu.pl

Oscylatory pokazane na rysunku 1 są jedynie przykładowymi oscylatorami i obrazują niewielką część konstrukcji, jakie można znaleźć w publikacjach; stanowią jedynie subiektywny wybór najczęściej stosowanych (zdaniem autorów) oscylatorów. Ponadto zostały one przedstawione w taki sposób, aby jak najprościej ukazać sposób ich działania.

Przykładowe zdjęcie oscylatora zostało przedstawione na rysunku 2. Oscylatory pneumatyczne są urządzeniami dwuwymiarowymi (dwa wymiary znaczące – szerokość, głębokość – oraz jedne wymiar nieznaczący – wysokość), które najczęściej wykonywane są metodą cięcia laserem lub strumieniem wody. Spowodowane jest to ich skomplikowanym kształtem oraz wysokimi wymaganiami co do chropowatości ścian. Wpływ chropowatości ścian oscylatorów na ich działanie został szerzej omówiony w [Hossain i in. 2017].

Oscylatory w zależności od ich konstrukcji można podzielić na oscylatory z pętlą sprzężenia zwrotnego [Chen i in. 2006, Yang i in. 2007] (rys. 1a, b), oscylatory wirowe Karmana [Tesař i Smyk 2015a] (rys. 1c, d) oraz oscylatory U- oraz V-kształtne [Lalanne i in. 2001, Lee i in. 2002]. Oscylatory, niezależnie od rodzaju, wykorzystuje się do chłodzenia elementów, konstrukcji urządzeń pneumatycznych, mieszania substancji, konstrukcji czujników i innych.



Rys. 2. Przykładowy oscylator wirowy Karmana z dwoma wyjściami wykonany w płycie PMMA technologią cięcia strumieniem wody (opracowanie własne)

W pracy opisano zasady działania oraz przedstawiono przykłady zastosowania oscylatorów płynowych. W tym celu zebrano i przedstawiono najciekawsze oraz najważniejsze (zdaniem autorów) przykłady zastosowania oscylatorów. Należy podkreślić, że wskazane zastosowania nie są wszystkimi, jakie można znaleźć w literaturze światowej.

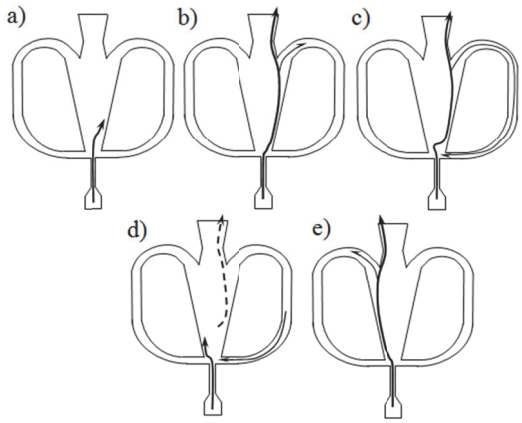
2. ZASADA DZIAŁANIA

Najczęściej stosowane są oscylatory z pętlą sprzężenia zwrotnego oraz oscylatory wirowe Karmana. W związku z małą liczbą polskich publikacji poświeconych temu tematowi wydaje się, że sposób ich działania oraz ich tematyka jest nieznana polskiemu czytelnikowi. W związku z tym w rozdziale omówiono zasadę działania wymienionych rodzajów oscylatorów na przykładzie oscylatora z pętlą sprzężenia zwrotnego z jednym wyjściem (rys. 1b) oraz oscylatora wirowego Karmana z dwoma wyjściami (rys. 1c).

2.1. Oscylatory z pętlą sprzężenia zwrotnego

Zasada działania oscylatora z pętlą sprzężenia zwrotnego opiera się w dużej mierze na zasadzie działania wzmacniacza analogowego, płynowego [Belsterling 1971], gdzie dysze kontrolne wzmacniacza zostały połączone z odpowietrznikami (ang. vent). Strumień główny dostaje się do oscylatora przez kanał wlotowy, skąd kierowany jest do dyszy. Po wylocie z dyszy strumień główny, na skutek efektu Coandy, przylega do jednej ze ścian komory roboczej (rys. 3a). Następnie strumień przepływa wzdłuż ściany komory i kieruje się do wylotu, gdzie przylega do jednej ze ścian wylotu (z tej samej strony co w komorze roboczej) i wypływa z oscylatora (rys. 3b). Pewna objętość tego strumienia płynu wpływa do pętli sprzężenia zwrotnego *l* (rys. 3b). Ponieważ początkowo wylot pętli *l* jest 'zablokowany' przez strumień główny, w pętli *l* gromadzi się pewna objętość płynów i rośnie ciśnienie statyczne. Po osiągnięciu pewnego krytycznego ciśnienia z pętli sprzężenia zwrotnego *l* wypływa strumień sterujący (rys. 3c), który odpycha strumień główny od ścianki, w skutek czego strumień główny przylega do naprzeciwległej ściany oscylatora (rys. 3d). Miejsce, w którym strumień sterujący oddziałuje na strumień główny, nazywa się regionem interakcji. Następnie przedstawiony cykl powtarza się.

Przełączanie strumienia głównego pomiędzy ścianami powoduje swoiste przeskakiwanie strumienia wylotowego między dwoma ścianami wylotu. Z tego powodu strumień ten nazywany jest strumieniem trzepoczącym (ang. flipping jet). Ponadto należy zauważyć, iż pomimo tego, że strumień główny skupiony jest przy jednej ze ścian wylotu oscylatora, przepływa on całym przekrojem wylotu.



Rys. 3. Zasada działania oscylatora z pętlą sprzężenia zwrotnego: a) przylgnięcie strumienia głównego do ściany komory roboczej, b) wypływ strumienia głównego, c) odepchnięcie strumienia głównego od ściany komory roboczej, d) przełączenie strumienia głównego i przylgnięcie do przeciwległej ściany, e) rozpoczęcie kolejnego cyklu pracy (opracowanie własne)

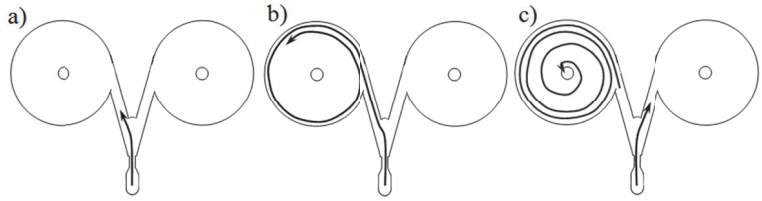
Oscylatory z pętlą sprzężenia zwrotnego z dwoma wylotami (rys. 1a) działają na podobnej zasadzie. Jednakże w czasie przełączania strumienia głównego, strumień ten zmienia nie tylko ścianę, wzdłuż której płynie, ale również kanał wylotowy.

W tym miejscu należy podkreślić, że przedstawione oscylatory z pętlą sprzężenia zwrotnego są oscylatorami z dodatnią pętlą, zwaną również pętlą Warrena [Tesa i Zhong 2013]. Istnieją jeszcze inne typy oscylatorów np. z ujemną pętlą, zwaną również pętlą Spyropoulos [Tesa i Zhong 2013].

2.2. Oscylator z komorą wirową

Innym typem oscylatorów płynowych są oscylatory z komorą wirową Karmana. Oscylatory z pętlą sprzężenia zwrotnego – zarówno oscylatory z jednym, jak i z dwoma wyjęciami – działają na podobnej zasadzie. Jednakże oscylatory wirowe z jedną i dwoma komorami wirowymi znacząco różnią się, jeżeli chodzi o sposób ich działania. Ponieważ jednak zasada działania oscylatora wirowego z jedną komorą jest bardzo podobna do działania wzmacniacza wirowego [Belsterling 1971], w tym miejscu zostanie przedstawiona zasada działania wirowego oscylatora Karmana z dwoma komorami (jest to przypadek łatwiejszy do wytłumaczenia oraz lepiej obrazuje role komory wirowej w oscylatorze). Dokładny opis działania oscylatora wirowego Karmana z jednym wyjściem można znaleźć w [Tesař i Smyk 2015a].

Strumień o stałym natężeniu wpływa do oscylatora przez wlot (rys. 1, rys. 2.2), a następnie poprzez dysze. Strumień uderza o rozdzielacz i przekierowywany jest do jednego z kanałów oscylatora (rys. 4a), gdzie przylega do jednej ze ścian kanału w skutek efektu Coandy.



Rys. 4. Zasada działania wirowego oscylatora Karmana: a) strumień przylega do ściany kanału oscylatora i przepływa do komory wirowej, b) strumień zaczyna wirować w komorze oscylatora, c) strumień główny zostaje przełączony i zmienia kanał, przez który przepływa, a zgromadzony w komorze wirowej płyn wypływa przez wylot (opracowanie własne)

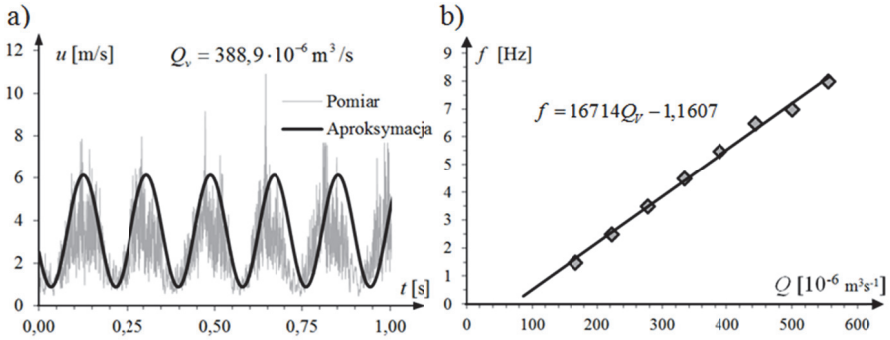
Następnie strumień wpływa do komory wirowej, gdzie zaczyna poruszać się ruchem wirowym (rys. 4b). Powietrze wirujące w komorze nie wypływa przez wylot oscylatora, ale gromadzi się w komorze oscylatora, co powoduje w niej wzrost ciśnienia. Gdy objętość płynu zgromadzona w komorze wirowej osiągnie wartość krytyczną, to wzrost ciśnienia w komorze oraz kanale oscylatora powoduje 'przełączenie' strumienia powietrza do drugiego kanału (rys. 4c). Jednocześnie cała objętość płynu wypływa z komory wirowej przez wylot. W tym samym czasie płyn roboczy gromadzi się już w drugiej komorze, co powoduje powtórzenie opisanego cyklu.

3. URZĄDZENIA POMIAROWE

Pierwszym przykładem wykorzystania oscylatorów jest użycie ich w konstrukcji mierników natężenia przepływu. W pracy [Chen i in. 2006] została omówiona możliwość wykorzystania oscylatorów pneumatycznych jako przepływomierzy. Należy nad-

mienić, że w pracy [Chen i in. 2006] autorzy odwołują się głównie do publikacji sprzed roku 2000, co pokazuje, że takie wykorzystanie oscylatorów zostało wyparte przez inne metody pomiaru (np. przepływomierze termiczne). Jednakże w pracy [Lee i in. 2002] przedstawiono badania urządzenia do pomiaru prędkości średniej strugi płynu (w dyszy) z wykorzystaniem oscylatora V-kształtnego. Prezentowane w pracy urządzenie pozwala na pomiar prędkości strumienia o prędkości od 0,15 mm/s przy liczbie Reynoldsa od 0,2 do 5,4. Jest to istotne ze względu na prostą konstrukcję prezentowanego urządzenia oraz zakres pomiarowy obejmujący niewielkie wartości, co jest niejednokrotnie trudne do uzyskania przy stosowaniu innych metod pomiarowych.

Urządzenia przedstawione w pracy [Chen i in. 2006] oraz [Lee i in. 2002] wykorzystują zależność częstotliwości oscylacji strumienia wyjściowego do natężenia przepływu strumienia wejściowego. Zależność ta jest najczęściej liniowa [Lee i in. 2002], zbliżona do liniowej [Chen i in. 2006, Yang i in. 2007] lub inna w przypadku odpowiedniej zmiany geometrii oscylatora [Tesař i in. 2014, Hossain i in. 2017]. Przykładowa zależność częstotliwości od natężenia przepływu oraz przebieg prędkości średniej w czasie dla strumienia wylotowego, na przykładzie oscylatora wirowego Karmana z dwoma komorami, został pokazany na rysunku 5. Jak widać sygnał wyjściowy (rys. 5) jest sygnałem okresowym o stałej częstotliwości i amplitudzie.



Rys. 5. Przykładowy przebieg prędkości średniej w czasie (a) dla jednego ze strumieni wyjściowych oraz zależność częstotliwości strumieni wyjściowych od natężenia przepływu (b) w wirowym oscylatorze Karmana z dwoma komorami [Peszyński i in. 2016]

4. AKTYWNE STEROWANIE STRUMIENIAMI

Oscylatory płynowe znalazły powszechne zastosowanie w aktywnym sterowaniu strumieniami, które polega na zmianie własności przepływu poprzez dostarczenie dodatkowej energii do układu (w przypadku oscylatorów jest to strumień zasilający). Poniżej przedstawiono wybrane przykłady zastosowania oscylatorów w sterowaniu przepływem.

4.1. Boeing 757 ecoDemonstrator

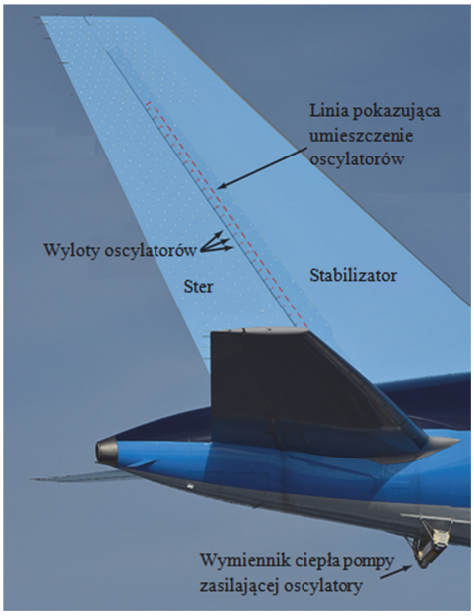
Jednym z najciekawszych i najokazalszych przykładów wykorzystania oscylatorów płynowych w aktywnym sterowaniu przepływem jest przykład Boeinga 757 nazwanego ecoDemonstratorem [https://www.nasa.gov/aero/nasa-tests-green-aviation-technology-on-boeing-ecodemonstrator.html]. W ramach projektu NASA (ang. National Aeronautics and Space Administration, pol. Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej), którego celem było zmniejszenie oporów aerodynamicznych,

wyposażyła ogon samolotu Boeing 757 w 31 małych oscylatorów płynowych, które zostały zamontowane na stateczniku samolotu (rys. 6), natomiast skrzydła zaopatrzono w powłokę non-stick, mającą na celu zmniejszenie wirów brzegowych. Pomiary przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym, na pełnowymiarowym modelu statecznika (rys. 6b), wykonane w Centrum Badań NASA, pokazały, że zastosowanie oscylatorów pozwoliło na zwiększenie siły bocznej od 20 do 30%. Należy wytłumaczyć, że takie zwiększenie siły bocznej pozwala na zmniejszenie wymiarów statecznika o 17%, co z kolei przekłada się na zmniejszenie zużycia paliwa o ok. 0,5% [https://www.nasa.gov/aero/nasa-tests-green-aviation-technology-on-boeing-ecodemonstrator.html].

Warto nadmienić, że w ramach tego samego projektu przetestowano różne powłoki, zapobiegające przyklejaniu się insektów (ten problem dotyczy nie tylko samochodów, ale i samolotów). Badania wykazały, że zachowanie laminarnego przepływu wokół skrzydeł samolotu (insekty przyklejone do powłoki wpływają znacząco na opływ powietrza wokół skrzydła) pozwala zredukować zużycie paliwa nawet do 6% [https://www.nasa.gov/aero/nasa-tests-green-aviation-technology-on-boeing-ecodemonstrator.html]. Jest to powód stosowania w samolotach specjalnych powłok, mających na celu zapobieganie przylepianiu się insektów do skrzydeł i kadłuba samolotu.

Kolejnym etapem były badania na modelu rzeczywistym. W ramach projektu przeprowadzono 15 planowych lotów, w czasie których mierzono parametry lotu oraz zużycie paliwa [https://www.nasa.gov/aero/nasa-tests-green-aviation-technology-on-boeing-ecodemonstrator.html]. Badania te zakończyły się wraz z końcem 2015 roku.

a)



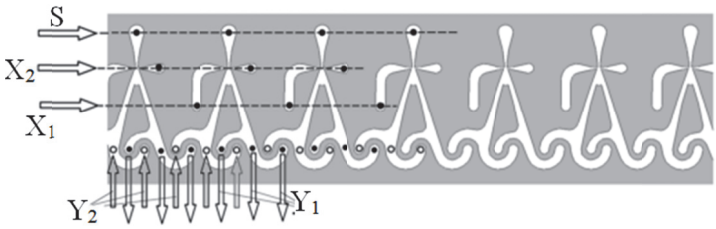
Rys. 6. a) oprzyrządowanie do aktywnego sterowania strumieniami zamontowane na Boeingu 757 [https://www.nasa.gov/aero/nasa-tests-green-aviation-technology-on-boeing-ecodemonstrator.html]

b)

b) pełnowymiarowy model statecznika wyposażony w oscylatory pneumatyczne oraz czujniki [https://www.nasa.gov/content/nasa-boeing-finish-tests-of-757-vertical-tail-with-advanced-technology]

4.2. Turbiny wiatrowe

Turbiny wiatrowe są tematem bardzo modnym i eksploatowanym. Jako źródło czystej, odnawialnej energii dąży się do zwiększania ich efektywności. Jedną ze stosowanych metod jest aktywne sterowanie strumieniami, które opływają łopaty turbin, w celu zmniejszenia oporów ruchu. Ma to na celu podwyższenie sprawności elektrowni wiatrowych. W pracy [Tesař i in. 2008] przedstawiono metody sterowania sposobu odrywania się strumienia od łopaty turbiny z wykorzystaniem strumieni syntetyzowanych (ang. sunthetic jet) oraz zaworów płynowych, które jako strumień sterujący wykorzystują strumienie syntetyzowane. Pomimo braku związku z omawianym tematem w pracy [Tesař i in. 2008] konstrukcja zaworów opiera się na geometrii oscylatorów z pętlą sprzężenia zwrotnego. Koncepcja wykorzystania oscylatorów w turbinach wiatrowych została podjęta między innymi w pracach [Resheed 2012, 2013, Tesar i in. 2013]. W pracach tych nie przedstawiono jednak konkretnych zastosowań, a jedynie koncepcje i badania oscylatorów i ich układów (wielu oscylatorów połączonych ze sobą), które mogą być zastosowane w łopatach turbin wiatrowych. Przykładowe układy oscylatorów przedstawiono na rysunku 7.

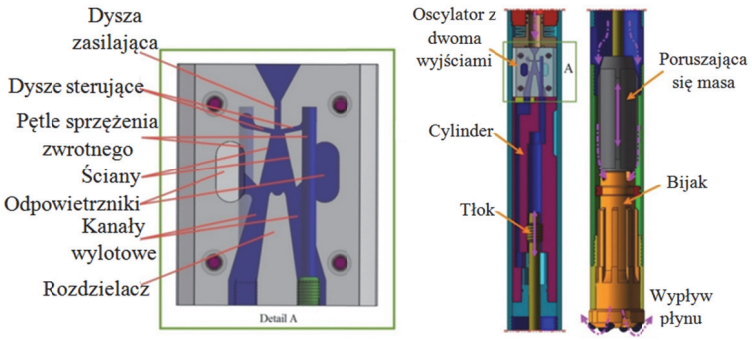


Rys. 7. Przykładowy układ oscylatorów możliwy do zamontowania w łopatach turbin wiatrowych S – zasilanie oscylatorów, X_1, X_2 – dopływy strumieni sterujących, Y_1, Y_2 – możliwe wypływ strumieni głównych w sąsiadujących dyszach oscylatorów, dla rozróżnienia zaznaczone odwrotnymi strzałkami [Tesař i in. 2008]

Zastosowane oscylatory nie są klasycznymi oscylatorami z dwoma wyjściami. Zostały zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwić wypływ z trzech różnych wylotów (Y_1, Y_2) dla każdego kanału (jeden wypływ otwarty, pozostałe dwa zaślepione), natomiast strumienie sterujące dostarczane są w sposób niezależny. Taki projekt oscylatora pozwala połączyć wlot strumienia sterującego X_1 i X_2, tak aby uzyskać negatywną pętlę sprzężenia zwrotnego lub zostawić otwarte (strumień sterujący zasysany jest przez strumień główny z atmosfery, lub doprowadzany sztucznie). Różnica długości, a więc oporów przepływu, kanałów doprowadzających sygnał sterujący powoduje pojawienie się oscylacji (w przypadku gdy nie dostarczamy dodatkowo strumienia sterującego). Różnice ta można sztucznie modyfikować poprzez dołożenie odcinak przewodu na jednym z wyjść X_1 lub X_2. Badania wpływu długości przewodu doprowadzającego sygnał sterujący na częstotliwość oscylacji omówiono między innymi w pracach [Tesař i in. 2008, Tesař i Smyk 2015a].

5. MŁOT

Niecodziennym, ale ciekawym przykładem wykorzystania oscylatorów jest młot płynowy (ang. fluidic hamer) [Peng i in. 2013, Zhang i in. 2016]. Młot płynowy, zwany dalej po prostu młotem, jest urządzeniem, które wykorzystuje ciśnienie płynu do nadania energii kinetycznej ruchomej masie (rys. 8).



Rys. 8. Schemat 3D młota oraz oscylatora wraz z wyszczególnionymi częściami charakterystycznymi urządzenia [Zhang i in. 2016]

Płyn dostarczany jest z dużą energią kinetyczną do młota poprzez dyszę zasilającą i wypływa do regionu interakcji, skąd kierowany jest do jednego z kanałów wylotowych i dalej do jednego z kanałów cylindra. Naprzemienny wzrost ciśnienia w kanałach cylindra powoduje ruch tłoku i zamontowanej na nim masy w górę i w dół. Dotarcie tłoku do jednego ze skrajnych położeń powoduje gwałtowny wzrost ciśnienia w cieczy, spowodowany nagłym zatrzymaniem się dużej masy. Pulsacja powstająca w cieczy rozchodzi się po całej jej objętości, a w szczególności przez odpowiednio zaprojektowaną pętlę sprzężenia zwrotnego, z której energia poprzez dyszę sterującą 'uderza' w strumień główny i powoduje jego przełączenie w oscylatorze. Takie zachowanie się układu powoduje pojawianie się okresowej siły o tej samej wartości, która przekazywana jest do bijaka młota.

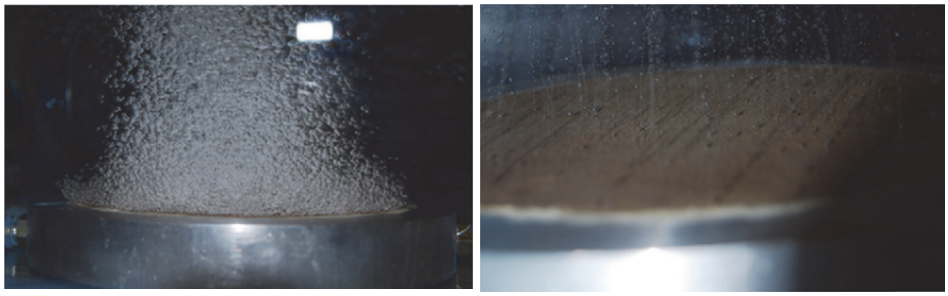
W pracy [Zhang i in. 2016] wykazano dodatkowo, że na generowaną przez młot energię mają wpływ nie tylko natężenie przepływu strumienia zasilającego oraz konstrukcja oscylatora, ale również średnica tłoka, średnica prętu łączącego tłok i masę, rozmiary geometryczne ruchomej masy oraz jej waga. Konstrukcja prezentowanego urządzenia jest niezwykle skomplikowana, ale również nowatorska (autorom nie udało się znaleźć innych przykładów na wykorzystanie oscylatorów w podobnych konstrukcjach).

6. MIKROPĘCHERZYKI

Mikropęcherzyki (ang. microbubbels) to nazwa pęcherzy powietrza w wodzie lub innej cieczy, których średnica mieści się w zakresie od 1 μm do 1 mm. Ich uzyskanie nie jest wcale proste co może potwierdzić każdy, kto widział kiedyś działający w akwarium napowietrzacz w formie kamienia.

Tradycyjne aeratory (urządzenia służące do aeracji, czyli napowietrzania) stosowane do napowietrzania wody mają niewielkie pory o średnicy hydraulicznej poniżej 1 mm. Jednakże generowane przez nie bąbelki powietrza mają średnice kilkakrotnie, a nawet kilkadziesięciokrotnie razy większą niż one, np. pory o średnicy 0,12 mm generują pęcherzyki o średnicy 5,7 mm [Tesař 2017]. Natomiast zmniejszenie średnicy pęcherzyków powietrza zwiększa ich rozpuszczalność, a więc i stopień napowietrzenia wody (dokładny opis i uzasadnienie zjawiska można znaleźć w [Tesař 2017]), co jest bardzo ważne np. w trakcie hodowli alg [Hanotu i in. 2012]. Poszukiwano więc metod, które pozwolą na zwiększenie sprawności aeratorów lub w inny sposób zwiększą ilość rozpuszczanego w wodzie powietrza.

Jednym z możliwych rozwiązań okazała się zmiana sposobu zasilania aeratorów. Zamiast klasycznego zasilania ich strumieniem ciągłym zasilono je strumieniem zmiennym generowanym przez oscylator. W pracach [Zimmerman i in. 2009, Brittle i in. 2015] wykazano zależność pomiędzy częstotliwością strumienia zasilającego aeratora, rozmiarem generowanych pęcherzyków. Na rysunku 9 pokazano różnicę pomiędzy pęcherzykami generowanymi przy zasilaniu membrany z mikroporami przez strumień ciągły oraz przez strumień generowany przez oscylator płynowy.



Rys. 9. Pęcherzyki generowane przez membranę z mikroporami zasilaną przez strumień ciągły (po lewej) oraz zasilaną przez strumień generowany przez oscylator (po prawej) [Busuttil 2010]

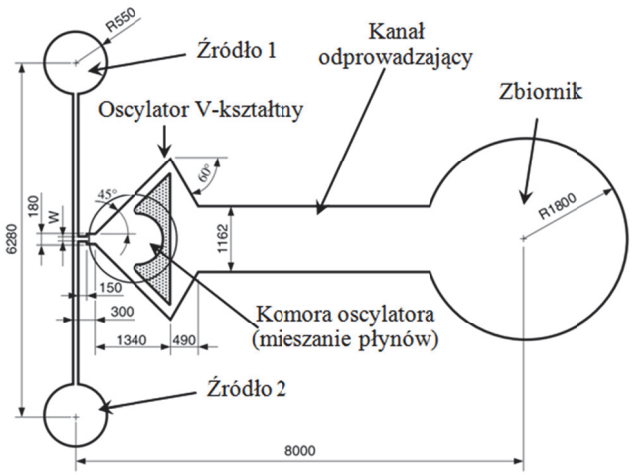
Należy podkreślić, że mikropęcherzyki znalazły bardzo wiele zastosowań między innymi w wymianie ciepła, oczyszczaniu wody, biomedyce, technikach oddzielania substancji (np. oddzielanie alkoholu z mieszanony), w produkcji jedzenia, w zmniejszaniu oporów ruchu jednostek wodnych [Tesař 2017]. Jednym z ciekawszych i nieoczywistych jest zastosowanie mikropęcherzyków w hodowli kukurydzy [Lei i in. 2016], gdzie były one wykorzystywane do napowietrzania i oczyszczania stosowanej wody.

7. MIESZANIE

Oscylatory od wielu lat są stosowane do mieszania strumieni. Można znaleźć wiele publikacji na ten temat na przestrzeni lat [Wood i in. 1991, Raman i Cornelius 1995, Gregory i in. 2005].

Oscylatory płynowe mogą być wykorzystywane do mieszania w dwojaki sposób. W badaniach [Sun i Sun 2011] wykorzystano oscylator V-kształtny jako swoistą komorę, w której zachodzi mieszanie. Oscylator zasilany był z dwóch źródeł przez oddzielne kanały dolotowe, które łączyły się przed dyszą oscylatora (rys. 10).

Następnie dostarczona do oscylatora mieszanina wpływa do komory oscylatora, gdzie miesza się w skutek powstawania wirów i swoistego przeskakiwania strumienia pomiędzy dwoma wylotami. Obszar, w którym dochodzi do najintensywniejszego mieszania się substancji, zaznaczono na rysunku 10 kółkiem. Dalej wymieszana ciecz przepływa do kanału odprowadzającego, gdzie następuje dalsze mieszanie się cieczy w jego początkowej części i dalej jako strumień ciągły (lub zbliżony do ciągłego) przepływa do zbiornika.



Rys. 10. Model urządzenia do mieszania dwóch rodzajów płynów z wykorzystaniem oscylatora V-kształtnego wraz z zaznaczonymi jego podstawowymi elementami [Sun i Sun 2011]

W pracy [Sun i Sun 2011] przedstawiono dwie różne konstrukcje oscylatora oraz zbadano sposób mieszania się substancji dla różnych liczb Reynoldsa. Należy nadmienić, że w przypadku przepływu strumienia przez układ z liczbą Reynoldsa Re = 150 substancje się praktycznie nie mieszały (dla większości z badanych wariantów oscylatorów). Dopiero przy zwiększeniu liczby Reynoldsa do Re = 300 następowało relatywnie dobre mieszanie się dostarczanych do układu substancji. Należy nadmienić, że aby zwiększyć liczbę Reynoldsa w układzie, należało zwiększyć prędkość średnią strumieni wpływających do oscylatora, co wiązało się ze wzrostem częstotliwości oscylacji strumienia. W pracy [Sun i Sun 2011] przedstawiono wizualizację mieszanych substancji, na których doskonale widać sposób mieszania się zastosowanych płynów.

Inny sposób wykorzystania oscylatorów do mieszania opisano w pracy [Mi i in. 2001]. Przedstawiono oscylator z pętlą sprzężenia zwrotnego z jednym wyjściem, który generuje tak zwane strumienie trzepoczące. Badano zachowanie strumienia wypływającego z wylotu oscylatora, znajdującego się w dyszy oraz porównywano go ze strumieniem ciągłym wydostającym się z tej samej dyszy. Wykazano, że w przypadku zastosowania oscylatora uzyskuje się wyższe parametry prędkości (względnych) oraz większe turbulencje, co jest efektem pożądanym. Prezentowane w pracy [Mi i in. 2001] rozwiązanie zaprojektowano tak, aby istniała możliwość wykorzystania go w układach przygotowania mieszanki paliwowej.

Podsumowując, w rozdziale przedstawiono możliwość zastosowania oscylatorów płynowych w mieszaniu substancji; po pierwsze – jako swoistej mieszarki, po drugie – ich wykorzystanie w celu polepszenia mieszania poprzez modyfikacje parametrów strumienia, który ma być mieszany.

8. INNE ZASTOSOWANIA

Problematyka dotycząca oscylatorów płynowych jest ciągle rozwijana. Wydaje się, że szczególne nadzieje można wiązać z zastosowaniami na tle aktywnego sterowania strumieniami i zmniejszaniem oporów aero- i hydrodynamicznych. Jednakże rozwijane są również inne dziedziny techniki, w których można je zastosować, jak choćby

techniki mikrostrumieniowe, gdzie wykorzystuje się tak zwane oscylatory mikropłynowe [Simôes i in. 2005, Gregory i in. 2007, Mosadegh i in., 2010]. Aby zobrazować skalę wykorzystywanych urządzeń, należy nadmienić, że przedstawiony w pracy [Yanga i in. 2007] oscylator mieści się na płytce o wymiarach 10x10 mm, a jego dysza wlotowa ma szerokość 16 μm.

Oscylatory płynowe stosowane są we wszelakiego rodzaju czujnikach niezwiązanych z natężeniem przepływu lub prędkością średnią. W pracy [Tesaŕa i Smyka 2015b], przedstawiono przykład zastosowania wirowego oscylatora Karmana w bardzo czułym czujniku wielopasmowym. W tym rozwiązaniu wykorzystano mieszające własności strumieni generowanych przez oscylator, do oderwania cząsteczek od powierzchni i dostarczeniu ich do sondy czujnika.

9. PODSUMOWANIE

W pracy zebrano i przedstawiono podstawowe wiadomości na temat oscylatorów płynowych. Zaprezentowano istotę ich funkcjonowania oraz zasadę działania oscylatora z dodatnią pętlą sprzężenia zwrotnego (pętlą Warrena) oraz dwoma wyjściami oraz wirowego oscylatora Karmana z dwoma wyjściami.

Omówiono podstawowe właściwości oscylatorów oraz ich najciekawsze zastosowania (zdaniem autorów) – między innymi zastosowanie w konstrukcji przepływomierzy, aktywnym sterowaniu przepływami, konstrukcji młota hydraulicznego czy do produkcji mikropęcherzyków. Należy nadmienić, że w pracy nie wyczerpano tematu i w literaturze można znaleźć jeszcze wiele innych zastosowań oscylatorów płynowych.

PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2015/2018 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamentowy Grant". Pierwszy autor otrzymał również wsparcie instytucjonalne BSM-60/2017 udzielone przez WIM UTP.

LITERATURA

Belsterling C.A., 1971. Fluidic systems design (I). Wiley-Interscience, a Division of John Wiley & Sons, Inc.

Brittle S., Desai P., Choon W., Dunbar A., Howell R., Tesar V., 2015. Minimising microbubble size through oscillation frequency control. Chemical Engineering Research and Design 104, 357-366.

Busuttil K., 2010. Microbubbles take first prize. Materials Today 13(4), 6.

Chen C.-K., Wang L., Yang J.-T., Chen L.-T., 2006. Experimental and Computational Analysis of Periodic Flow Structure in Oscillatory Gas Flow Meters. Journal of Mechanics 22(2), 137-144.

Gregory J.W., Sullivan J.P., Raghu S., 2005. Visualization of jet mixing in a fluidic oscillator. Journal of Visualization 8(2), 169-176.

Gregory J.W., Sullivan J.P., Raman G., Raghu S., 2007. Characterization of the microfluidic oscillator. AIAA Journal 45(3), 568-576.

Hanotu J., Hanotu Bandulasena H.C., Zimmerman W.B., 2012. Microflotation performance for algal separation. Biotechnology and Bioengineering 109(7), 1663-1673.

Hossain M.A., Prenter R., Agricola L., Lundgreen R.K., Ameri A., Gregory J.W., Bons J.P., 2017. Effects of Roughness on the Performance of Fluidic Oscillators. Materiały z 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, (January).

Lalanne L., Le Guer Y., Creff R., 2001. Dynamics of a bifurcating flow within an open heated cavity. International Journal of Thermal Sciences 40(1), 1-10.

Lalli F., Bruschi A., Lama R., Liberti L., Mandrone S., Pesarino V., 2010. Coanda effect in coastal flows. Coastal Engineering 57(3), 278-289.

Lee G. Bin, Kuo T.Y., Wu W.Y., 2002. A novel micromachined flow sensor using periodic flapping motion of a planar jet impinging on a V-shaped plate. Experimental Thermal and Fluid Science 26(5), 435-444.

Lei H., Bhattarai S., Balsys R., Midmore D.J., Holmes T., Zimmerman W.B., 2016. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil – less irrigation systems. Irrigation Science 34(6), 421-430.

Lien T.K., Davis P.G.G., 2008. A novel gripper for limp materials based on lateral Coanda ejectors. CIRP Annals – Manufacturing Technology 57(1), 33-36.

Mi J., Nathan G.J., Luxton R.E., 2001. Mixing Characteristics of a Flapping Jet from a Self-Exciting Nozzle. Flow, Turbulence and Combustion 67, 1-23.

Mosadegh B., Kuo C.H., Tung Y.C., Torisawa Y.S., Bersano-Begey T., Tavana H., Takayama S., 2010. Integrated elastomeric components for autonomous regulation of sequential and oscillatory flow switching in microfluidic devices. Nature Physics 6(6), 433-437.

Peng J.M., Yin Q.L., Li G. lin, Liu H., Wang W., 2013. The effect of actuator parameters on the critical flow velocity of a fluidic amplifier. Applied Mathematical Modelling 37(14-15), 7741-7751.

Peszynski K., Smyk E., Wawrzyniak S., Perczynski D., 2016. Research of vibration asymmetry of fluidic oscillator with vortex chambers. EPJ Web of Conferences, 2149.

Raman G., Cornelius D., 1995. Jet mixing control using excitation from miniature oscillating jets. AIAA Journal 33(2), 365-368.

Rasheed F., 2013. Development of Fluidic Oscillator Based Active Flow Control System for Wind Turbine Blades. Materiały z the Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 1286-1293.

Resheed F., 2012. Flow separation control on wnd turbine blades using an array of fluidic oscillators. The University of Menchester.

Simôes E.W., Furlan R., Leminski R.E.B., Gongora-Rubio M.R., Pereira M.T., Morimoto N.I., Avilés J.J.S., 2005. Microfluidic oscillator for gas flow control and measurement. Flow Measurement and Instrumentation 16(1), 7-12.

Sun C.L., Sun C.Y., 2011. Effective mixing in a microfluidic oscillator using an impinging jet on a concave surface. Microsyst Technol. 17, 911-922.

Tesař V., 2015. Fluidic Generator Of Microbubbles – Oscillator With Gas Flow Reversal For A Part Of Period. Acta Mechanica et Automatica 9(4), 195-203.

Tesař V., 2017. What can be done with microbubbles generated by a fluidic oscillator? (survey). EPJ Web of Conferences 143(2129).

Tesař V., Kordík, J., & Daněk M., 2008. Lift and separation control on wind turbine blades by vortices having streamwise oriented axes. Materiały z Colloquium of Fluid Dynamics.

Tesař V., Pavelka M., Smyk E., Peszynski K., 2014a. Control of flow separation by vestigal "Synthetic Jet". Materiały z Colloquium of Fluidic Dynamics.

Tesař V., Smyk E., 2015a. Fluidic low-frequency oscillator with vortex spin-up time delay. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 90, 6-15.

Tesař V., Smyk E., 2015b. Infrasonic fluidic oscillator for use in anti-terrorists warfare. In Safety and Security Engineering VI, 179-189.

Tesař V., Smyk E., Peszynski K., 2014b. Fluidic oscillator with bistable turn-down amplifier. Materiały z Colloquium of Fluidic Dynamics.

Tesar V., Zhong S., 2013. New Fluidic-Oscillator Concept for Flow- Separation Control New Fluidic-Oscillator Concept for Flow-Separation Control. AIAA Journal 51(2), 397-405.

Wood P., Hrymak A., Yeo R., Johnson D., Tyagi A., 1991. Experimental and computational studies of the fluid mechanics in an opposed jet mixing head. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics 3(5), 1362-1368.

Yang J.T., Chen C.K., Hu I.C., Lyu P.C., 2007. Design of a self-flapping microfluidic oscillator and diagnosis with fluorescence methods. Journal of Microelectromechanical Systems 16(4), 826-835.

Yang, J. T., Chen, C. K., Tsai, K. J., Lin, W. Z., Sheen, H. J., 2007. A novel fluidic oscillator incorporating step-shaped attachment walls. Sensors and Actuators, A: Physical, 135(2), 476-483.

Zhang X., Peng J., Ge D., Bo K., Yin K., Wu D., 2016. Performance Study of a Fluidic Hammer Controlled by an Output-Fed Bistable Fluidic Oscillator. Applied Sciences 6(10), 305.

Zimmerman W.B., Hewakandamby B.N., Tesarˇ V., Bandu, Hemakalasena H.C., Omotowa O.A., 2009. On the design and simulation of an airlift loop bioreactor with microbubble generation by fluidic oscillation. Food and Bioproducts Processing 87, 215-227.

Źródła internetowe:

https://www.nasa.gov/aero/nasa-tests-green-aviation-technology-on-boeing-ecodemonstrator.html (dostęp: 28.09.2017).

https://www.nasa.gov/content/nasa-boeing-finish-tests-of-757-vertical-tail-with-advanced-technology (dostęp: 28.09.2017).