

Witold SELEROWICZ, Andrzej P. SZUMOWSKI

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechnika Warszawska

OSCYLACJE PRZEPŁYWU PODDŹWIĘKOWEGO W PRZEWODZIE POSIADAJĄCYM SKOKOWY PRZYRÓST PRZEKROJU

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych oscylacji przepływu poddźwiękowego powstających w sposób samowzbudny w przewodzie posiadającym skokowy przyrósł przekroju w pobliżu wylotu. Wyodrębniono zakresy występowania oscylacji i przeprowadzono ich ogólną klasyfikację.

1. Wstęp

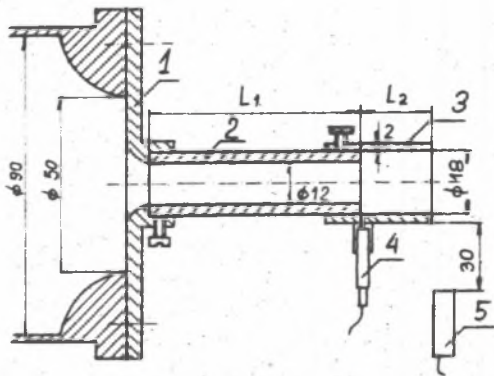
Skokowe rozszerzenie przekroju przewodu powoduje oderwanie strumienia i powstanie obszaru zastoju, co w pewnych warunkach staje się przyczyną samowzbudnych oscylacji przepływu. Oscylacje te są zwykle źródłem intensywnego hałasu.

W większości prac dotyczących przepływu w omawianej geometrii zajmowano się przepływem naddźwiękowym [1-5]. W zależności od wymiarów przewodu i stosunku ciśnień na jego końcach wyróżniono kilka typów oscylacji przejawiających się zmianami struktury fal uderzeniowych, wędrówką miejsca przyklejenia strumienia, itp. Pierwsze badania w zakresie przepływów poddźwiękowych prowadzono w aspekcie praktycznego wykorzystania oscylacji do intensyfikacji mieszania wpływającego strumienia gazu z gazem w otoczeniu [6]. W cytowanej pracy wyrażono sugestię, że oscylacje powodowane są cyklicznym przyklejaniem się i odrywaniem strumienia od rozszerzonej części przewodu /nasadki/. W pracach [7-9] zawierających obszerny materiał pomiarowy stwierdzono, że oscylacje powstają w warunkach rezonansu drgań słupa gazu w przewodzie doprowadzającym pobudzanych przez wiry cyklicznie spływające z krawędzi w miejscu skokowej zmiany przekroju i zderzające się ze ścianką nasadki. Autorzy [7-9] sugerują akustyczno-przepływowy mechanizm sprzężenia zwrotnego oscylacji. W pracy [10], w której skoncentrowano się na wyjaśnieniu mechanizmu oscylacji, stwierdzono na drodze pomiaru prędkości fazowych i wizualizacji smugowej występowanie silnych dyskretnych wirów. Wiry te poruszając się w nasadce powodują oscylacje ciśnienia w przewodzie w okolicy skokowej zmiany przekroju, pobudzając do drgań gaz w przewodzie doprowadzającym. Wyniki badań [10] wskazują, że mechanizm oscylacji jest czysto przepływowy.

Wydaje się, że żadnego z wymienionych mechanizmów nie można wykluczyć. Jest prawdopodobne, że w zależności od wymiarów układu i prędkości przepływu mogą wystąpić różne typy oscylacji, podobnie jak to zauważono w przepływie naddźwiękowym. W związku z tym, że w dotychczasowych badaniach liczba Macha przepływu nie przekraczała 0,26, w niniejszej pracy zainteresowano się pełnym zakresem przepływu poddźwiękowego. Celem pracy było przeprowadzenie klasyfikacji i zbadanie warunków występowania oscylacji. Badania przeprowadzono na drodze doświadczalnej przez pomiary ciśnienia w nasadce, ciśnienia akustycznego w polu bliskim i wizualizację przepływu.

2. Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

Sprężone powietrze po przejściu przez warstwę tłumiącą pulsacje pochodzące z układu zasilającego doprowadzane jest przewodem o średnicy 90 mm i dyszą zbieżną o średnicy wylotowej 50 mm do badanego układu /rys. 1/.



Rys. 1. Badany układ

- 1 - dysza zbieżna, 2 - przewód, 3 - nasadka
4 - przetwornik ciśnienia, 5 - mikrofon

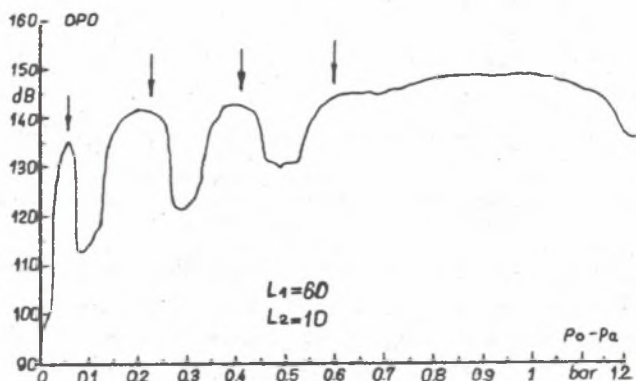
Układ ten złożony jest z wylotowej dyszy zbieżnej 1, przewodu 2 i nasadki 3. Używano przewodów o średnicy 12 mm i długościach $L_1 = 12$; 24 i 60 mm. Średnica nasadki wynosiła 18 mm, a jej długość L_2 mogła być zmieniana w sposób ciągły.

Do pomiarów ciśnienia w nasadce używano przetwornika piezoelektrycznego Kistler /typ 7031/ oraz miniaturowego przetwornika piezorezystywnego Kulite /typ XCS/. Ciśnienia akustyczne mierzono mikrofonami 1/2" i 1/8" B & K. Do analizy sygnałów używano dwukanałowego analizatora FFT Nicolet 660A. Wizualizację przeprowadzano metodą smugową i interferometryczną.

3. Wyniki

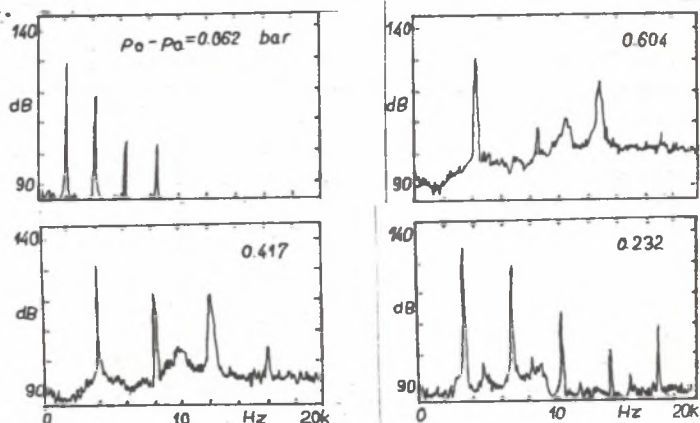
Oscylacje przepływu w omawianym układzie występują w pewnych zakresach różnic ciśnień: ciśnienia zasilania (p_0) i ciśnienia w otoczeniu (p_a). Zakresy te można wyodrębnić w oparciu o przebieg ciśnienia akustycznego /ogólnego poziomu dźwięku - CPD/ lub w oparciu o przebieg amplitudy oscylacji ciśnienia w nasadce.

W przebiegu CPD /rys. 2/ występuje kilka wartości szczytowych, wyższych o około 30 dB od poziomu podstawowego. Dla długości przewodu i nasadki podanych na rys. 2 kolejne szczyty pojawiają się przy następujących liczbach Macha wyznaczonych w oparciu o stosunki ciśnień p_a/p_0 : $M = 0,27; 0,5; 0,7$. Ostatni zarejestrowany wzrost CPD rozpoczyna się



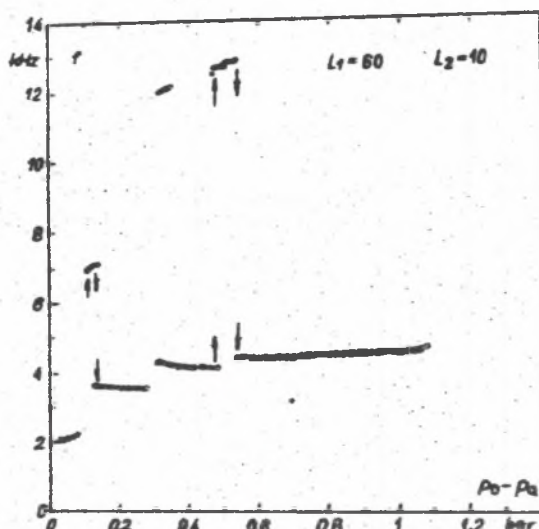
Rys. 2. Ogólny poziom dźwięku w funkcji różnicy ciśnień

przy $M = 0,82$ i rozciąga się do $M = 1$. Widma dźwięku dla charakterystycznych wartości p_0/p_a zaznaczonych na rys. 2 strzałkami pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Widma akustyczne dla różnic ciśnień zaznaczonych na rys.2.

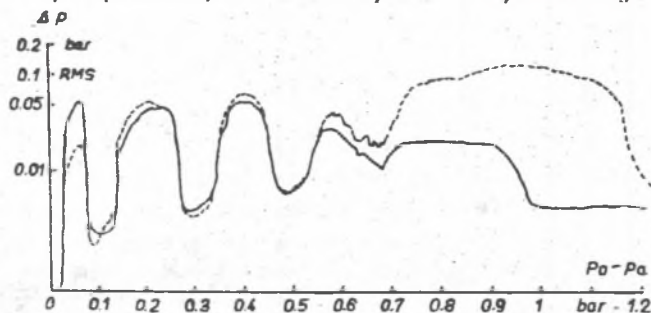
W widmach tych występują wyraźne składowe dyskretne powodowane oscylacjami przepływu. Częstotliwości składowych dyskretnych zestawiono na rys. 4.



Rys. 4. Częstotliwości dyskretne w widmie akustycznym; punkty ciemne oznaczają składowe o największej amplitudzie

Punkty pomiarowe odpowiadające tym częstotliwościom układają się w pewne pasma świadczące o występowaniu drgań rezonansowych. Pasma dolne o częstotliwościach od ~ 2 kHz do ~ 4 kHz związane są ze wzdłużnymi drganiami słupa gazu w przewodzie. Postać tych drgań odpowiada połowie (2 kHz) lub pełnej długości fali (4 kHz). Postacie drgań związane z pasmem środkowym ~ 7 kHz i pasmem górnym ~ 12 kHz nie zostały dotychczas wyjaśnione. Wyniki wizualizacji strumienia swobodnego wypływającego z układu oraz pomiary ciśnień w nasadce wykazały, że drgania odpowiadające pasmu dolnemu i środkowemu są symetryczne, a pasmu górnemu niesymetryczne.

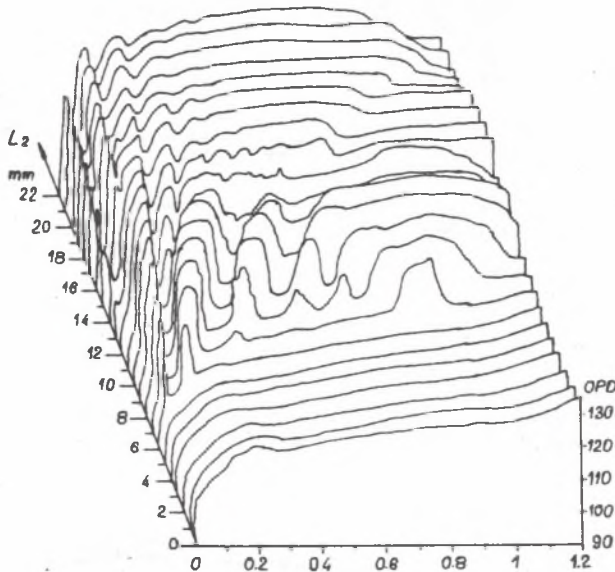
Przebiegi amplitudy oscylacji ciśnienia w funkcji $p_0 - p_a$ odpowiadające wyżej omawianym wykresom pokazano na rys. 5. Z rysunku tego wynika, że



Rys. 5. Amplituda oscylacji ciśnienia; linia ciągła - w połowie długości przewodu, linia przerywana - w nasadce

wzajemna relacja między amplitudą ciśnienia mierzonego w połowie długości przewodu i amplitudą mierzoną w nasadce zmienia się ze wzrostem liczby Macha przepływu. Dla małych wartości $M \approx 0,27$, odpowiadających pierwszemu szczytowi, amplituda ciśnienia w przewodzie jest około dwukrotnie większa od amplitudy w nasadce, co potwierdza wcześniejsze wnioski dotyczące drgań rezonansowych. Przy średnich wartościach M omawiane amplitudy są zbliżone, a przy dużych M amplitudy oscylacji w nasadce są wyraźnie większe.

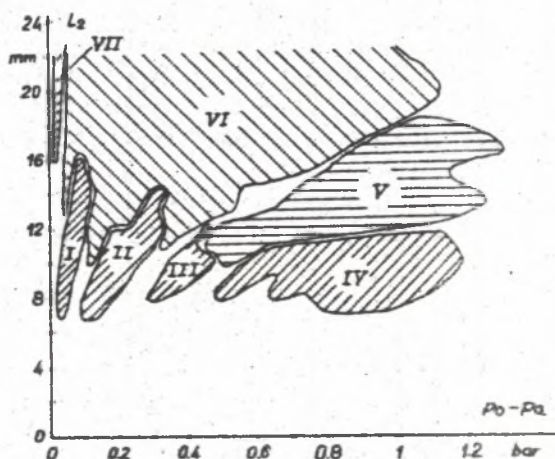
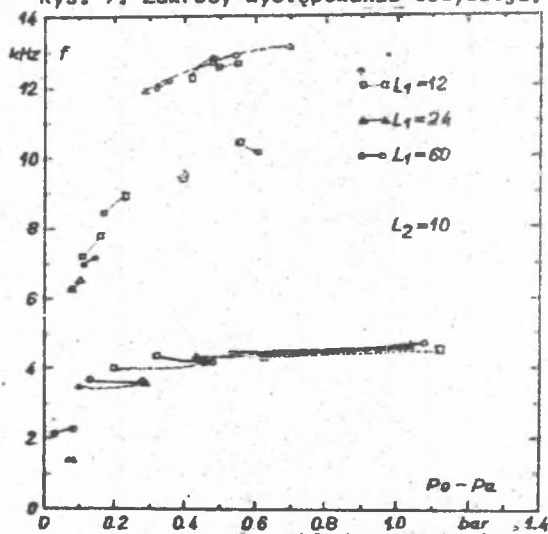
Na rys. 6 zestawiono przebiegi OPD w funkcji $p_0 - p_a$ dla różnych długości nasadki. Szczytowe wartości OPD układają się w pewne pasma, które



Rys. 6. Przebiegi ogólnego poziomu dźwięku dla różnych długości nasadki,
 $L_1 = 60 \text{ mm}$

odpowiadają określonym postaciom oscylacji. Zakresy występowania tych oscylacji przedstawiono na rys. 7. Oscylacje związane z obszarami I, II, III i IV i VI mają charakter symetryczny. Ich częstotliwości z wyjątkiem obszaru VI należą do dolnego pasma /rys. 4/. Obszar V odpowiada oscylacjom asymetrycznym.

Wpływ długości przewodu L_1 na częstotliwości składowych dyskretnych w widmie akustycznym przedstawiono na rys. 8. Częstotliwości w dolnym i górnym pasmie dla wybranych długości L_1 /wielokrotność 12 mm/ pokrywają się ze sobą. Pojawiają się jedynie różnice w zakresach $p_0 - p_a$ występowania oscylacji, co związane jest ze zmianą prędkości przepływu na skutek tarcia. Pewne różnice częstotliwości występują w paśmie środkowym.

Rys. 7. Zakresy występowania oscylacji, $L_2=60$ mm

Rys. 8. Dominujące składowe dyskretne w widmie akustycznym.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że w rozpatrywanym układzie występują następujące trzy typy oscylacji.

- a/ Oscylacje symetryczne o częstotliwościach do 4 kHz, którym towarzyszą dyskretne wiry toroidalne [10]. Strumień nie przykleja się do nasadki w żadnej fazie oscylacji.
- b/ Oscylacje symetryczne o częstotliwościach 4÷10 kHz silnie zależnych

od prędkości przepływu. W tym typie oscylacji strumień okresowo przykleja się i odrywa od ścianki.

c/ Oscylacje asymetryczne o częstotliwościach 11÷13 kHz, którym towarzyszą wiry spiralne.

Aktualnie prowadzone są badania zmierzające do wyjaśnienia mechanizmów oscylacji należących do drugiej i trzeciej grupy.

Literatura

- [1] Jungowski W.M.; Investigation of flow pattern boundary conditions and oscillation mechanism in a compressible flow through sudden enlargement of a duct, Prace Naukowe, Mechanika No 3, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1968.
- [2] Anderson I.S., Williams T.I.; Base pressure and noise produced by the abrupt expansion of air in a cylindrical duct, J.Mech.Eng.Sci., 10, 1968, 262-268.
- [3] Meier G.E.A., Grabitz., Jungowski W.M., Witczak K.J., Anderson I.S.; Oscillations of a supersonic flow downstream of an abrupt increase in duct cross-section, Mitteilungen aus dem MPI für Strömungsforschung und der AVA, No 65, Göttingen, 1978.
- [4] Anderson I.S., Meier G.E.A.; Steady and non-steady transonic flow in a duct with a sudden enlargement, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Bericht 1/1982.
- [5] Szumowski A.P., Meier G.E.A.; Schwingungen der Überschallströmung in einem Kanal mit Querschnittsprung, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Bericht 23/1978.
- [6] Hill W.G., Greene P.R.; Increased turbulent jet mixing rates obtained by self-excited acoustic oscillations, J.Fluid Eng. /Trans. ASME/, 99, 1977.
- [7] Hasan M.A.Z., Hussain A.K.M.F.; A formula for resonance frequencies of a whistler nozzle, J.Acoust.Soc.Am. 65, 5, 1979, 1140-1142.
- [8] Hasan M.A.Z., Hussain A.K.M.F.; The self-excited axisymmetric jet, J.Fluid Mech. vol. 115, 1982, 59-89.
- [9] Hussain A.K.M.F., Hasan M.A.Z.; The "whistler-nozzle" phenomenon, J. of Fluid Mech., vol. 134, 1983, 431-458.
- [10] Szumowski A.P., Piechna J.; Self-exciting flow oscillation in an abruptly expanding circular duct as a noise source, Archives of Acoustics, vol. VIII, No. 4, 1983.

КОЛЕБАНИЯ ДОЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ТРУБОЙ С ВНЕЗАПНОМ РАСШИРЕНИЕМ

Р е з ю м е

Течение трубой с внезапном расширением сечения характеризуется в некоторых случаях колебаниями большой амплитуды. Такое течение исследовано в этой работе экспериментально. В зависимости от разницы давления на концах трубы и её размеров замечено три типа колебаний. Симметричные колебания в которых вытекающая струя газа отрывается от стенки расширенной части трубы а также симметричные колебания в которых струя переменнo отрывается и прилепляется к стенке. Колебания течения генерируют дискретный шум, который превосходит шум турбулентный в 40 дБ.

SUBSONIC FLOW OSCILLATIONS IN AN ABRUPTLY EXPANDING CIRCULAR DUCT

С и ж н а г у

The flow in an abruptly expanding ducts shows self-excited oscillations of considerable amplitudes. In this paper a subsonic flow is experimentally studied. Depending on the pressure difference at the duct ends and on the duct dimensions three oscillation types have been distinguished. The symmetrical and antisymmetrical oscillations characterized by separated jet in the abruptly expanding sections as well as the symmetrical oscillations, in which the jet periodically separates and reattaches to the wall. The oscillations are accompanied by intensive noise, which overstep the turbulent one in 40 dB.