

Roman KLAJNY

Roman WOLAŃSKI

Instytut Maszyn Ciepłych  
Politechniki CzęstochowskiejROZWÓJ POŁA TEMPERATUR W TURBULENTNEJ STRUDZE  
SWOBODNEJ PODDANEJ ODDZIAŁYWIANIOM AKUSTYCZNYM

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono model przepływu w swobodnej strudze powietrza poddanej oddziaływaniom fal akustycznych. Podano rozkłady wielkości turbulentnych i termicznych otrzymane w drodze eksperymentu.

Rozwój pól prędkości i temperatur w strugach swobodnych stymulowany może być skutecznie oddziaływaniem fal akustycznych czystego tonu. Z licznych badań [1,2,3,6] wynika, że periodyczne zmiany ciśnienia towarzyszące rozprzestrzenianiu się fali akustycznej wzmagają procesy tworzenia się regularnych struktur wirowych o skalach zależnych od częstotliwości fali ciśnieniowej. Wzrost w przepływie udziału uporządkowanych struktur wirowych oddziałuje w istotny sposób [6] na średnie i turbulentne parametry strug swobodnych. W tych warunkach spodziewać się można, że pole akustyczne wywierać będzie wpływ na parametry termodynamiczne gorącej strugi wpływającej do nieruchomego ośrodka o niższej temperaturze. Problemowi wymiany ciepła w swobodnych przepływach zaburzonych polem akustycznym poświęconych jest stosunkowo niewiele publikacji [1,5], toteż niniejsza praca jest próbą wypełnienia istniejącej w tym zakresie luki.

Jeżeli przyjąć, że częstotliwość sinusoidalnej fali akustycznej skierowanej na swobodną strugę powietrza jest równa częstotliwości własnej pewnego procesu w przepływie, to można oczekiwać rezonansowego wzmocnienia amplitudy tego procesu. Takim wzmocnieniom mogą podlegać zaburzenia w warstwie przysiciennej spływającej z dyszy, zwane falami Tollmiena - Schlichtinga. Wydaje się, że wzmocnienie fali Tollmiena - Schlichtinga porządkuje naturalny proces rozwoju gruboskalowych wirów w obszarze mieszania strugi i prowadzi do wzrostu udziału ruchu zorganizowanego w przepływie. Wśród gruboskalowych wirów wyróżnić można dwa ich rodzaje: wiry nie łączące się w pary i wiry, które łącząc się parami tworzą spójne turbulentne struktury. Wirom pierwszego rodzaju odpowiada liczba  $St_d$  mniejsze od 0,6, natomiast wirów "parujących się" liczby Strouhala w zakresie od 0,6 do około 1,4. Oddziaływanie akustyczne o liczbach Strouhala mniejszych od 1,4 nazywane jest oddziaływaniem niskoczęstotliwościowym. W swobodnym przepływie obserwuje się również obecność struktur wirowych o małej skali, którym można przyporządkować liczby  $St_d$  z przedziału 1,5 do 6,0. Te drobnoskalowe wiry powstają w wyniku wzrostu niestabilności cienkiej laminarnej warstwy spływającej ze ścianki dyszy wylotowej [4]. Przedstawiony model przepływu wydaje się być bardzo prawdopodobny zarów-

no dla strugi izotermicznej, jak i podgrzanej, przy czym istnieje możliwość jego eksperymentalnego zbadania.

Eksperymentem objęta została swobodna, osiowo - symetryczna struga powietrza o temperaturze  $T_w$ , wypływająca z dyszy do nieruchomego otoczenia o temperaturze  $T_{ot}$  (rys. 1). Pole akustyczne wytwarzano głośnikiem dynamicznym umieszczonym w ten sposób, aby cały obszar początkowy strugi poddany był periodycznym zmianom ciśnienia akustycznego. Fala scharakteryzowana była liczbą Strouhala  $St = \frac{f d}{U_w}$  i poziomem natężenia dźwięku [dB]. Częstotliwość fali wybrano tak, aby wzmocnienie struktur grubo- i drobno-skalowych było największe. Maksymalne wzmocnienia otrzymano przy liczbach  $St_1 = 0,43$  dla wirów nie łączących się,  $St_2 = 0,96$  dla wirów parujących się i  $St_3 = 3,19$  dla struktury drobnowirowej. W pomiarach wielkości średnich i fluktuacyjnych wykorzystano aparaturę termooptometryczną DISA 55 System, a badaniami objęte szczególnie początkowy obszar strugi przy liczbie  $Re = 40000$  i nadwyżce temperatury strugi nad temperaturą otoczenia  $\theta_w = 40$  deg. W obszarze tym wyróżnić należy trzy składniki ruchu: ruch średni, periodyczny ruch zorganizowany i właściwy, drobno-skalowy ruch turbulentny. Parametry aerodynamiczne i termodynamiczne można zatem zapisać w postaci:

$$U = \bar{U} + \bar{u} + u' ; T = \bar{T} + \mathcal{T} + \mathcal{T}'$$

Możliwości aparatury nie pozwalały na rozdzielenie składników periodycznych od turbulentnych, toteż prezentowane wyniki są funkcjami ich sumy:

$$\overline{u_r^2} = \overline{\bar{u}_r^2} + \overline{u_r'^2} ; \overline{\mathcal{T}^2} = \overline{\mathcal{T}^2} + \overline{\mathcal{T}'^2} ; \overline{u_r \mathcal{T}} = \overline{\bar{u}_r \bar{\mathcal{T}}} + \overline{u_r' \mathcal{T}'} ; \dots$$

Rys. 2 przedstawia łączny rozkład energii wyznaczony w osi przepływu dla określonych wcześniej częstotliwości fali dźwiękowej. Znacznie szybszy wzrost energii dla oddziaływań niskoczęstotliwościowych jest wynikiem rozwoju w strefie mieszania spójnych wirów o dużej skali [6], które intensyfikują proces mieszania. Wiry scharakteryzowane liczbą  $St_2 = 0,96$  tworzą po "sparowaniu" struktury o rozmiarach zbliżonych do wielkości wirów określonych liczbą  $St_1 = 0,43$  i w odległości powyżej 5d mają praktycznie ten sam udział w produkcji energii turbulencji. Przy oddziaływaniu wysokoczęstotliwościowym  $St_3 = 3,19$  obserwuje się znacznie wolniejszy wzrost energii w porównaniu z naturalną strugą. Jest to wynikiem dominacji w obszarze mieszania wirów o drobnej skali, które odbierają mniej energii od ruchu średniego.

Wpływ struktur wirowych na fluktuacje temperatury w osi strugi ilustruje rys. 3. W pobliżu wylotu dyszy nie ma żadnych istotnych zmian wartości  $\overline{\mathcal{T}^2}$ , których poziom uważać można za turbulentne tło termiczne w jądrze strugi. W odległości większej od 3d zauważa się gwałtowny wzrost termicznych fluktuacji, będący wynikiem transportu przez struktury wirowe chłodniejszego medium do obszaru osiowego strugi, co jest szczególnie wyraźne dla wirów gruboskalowych. Oddziaływanie wysokoczęstotliwościowe osłabia proces transportu w porównaniu ze strugą naturalną, skutkiem czego wzrost wartości  $\overline{\mathcal{T}^2}$  jest znacznie wolniejszy.

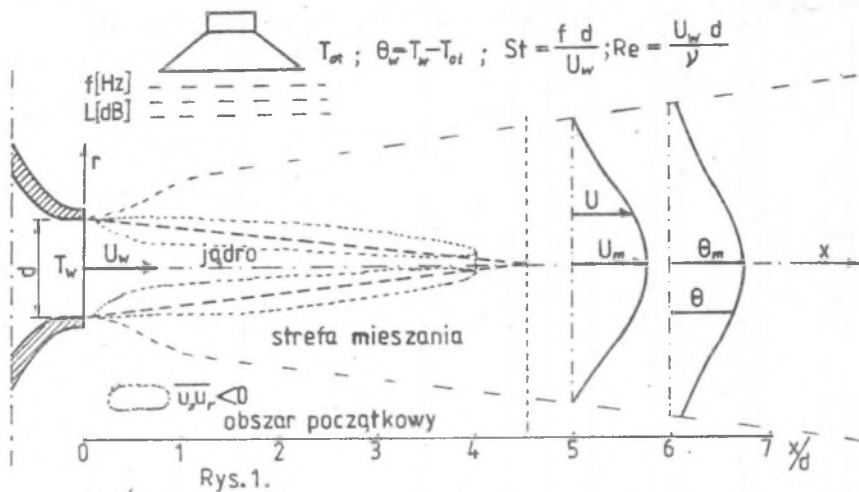
Efekty obserwowane w osi są w pewnym sensie obrazem zjawisk zachodzących w strefie mieszania a ich ilustracją mogą być rozkłady naprężeń normalnych  $\overline{u_x^2}$ ,  $\overline{u_r^2}$  i stycznych  $\overline{u_x u_r}$  wyznaczonych w przekroju  $X = 2,5d$  (rys. 4). Z naniesionych tu krzywych wynika, że wymuszenia akustyczne oddziałują głównie na wartości  $\overline{u_r^2}$  i  $\overline{u_x u_r}$ , nie widać natomiast większego wpływu na składową osiową naprężeń normalnych  $\overline{u_x^2}$ . Zwraca uwagę fakt, że naprężenia styczne  $\overline{u_x u_r}$  przyjmują wartości ujemne w obszarze bliskim granicy jądra (rys. 1). Można wykazać, że iloczyn korelacyjny  $\overline{u_x u_r}$  jest mniejszy od zera tam, gdzie dominuje periodyczny charakter przepływu, a poziom turbulentnego tła jest stosunkowo niski. Taki przepływ występuje w pobliżu granicy jądra potencjalnego.

Wzrost udziału ruchu zorganizowanego w strefie mieszania ma również wpływ na transport ciepła w strudze, co zilustrowano na rys. 5. Przy niskoczęstotliwościowym wymuszeniu widoczny jest wzrost fluktuacji termicznych i wzmocnienie dyfuzji ciepła w obszarze graniczącym z jądrem. Wysokoczęstotliwościowe ekscytacje osłabiają natomiast silnie wymianę ciepła, skutkiem czego  $\overline{v^2}$  i  $\overline{u_r v}$  przyjmują znacznie mniejsze wartości w porównaniu z przepływem wolnym od oddziaływań zewnętrznych.

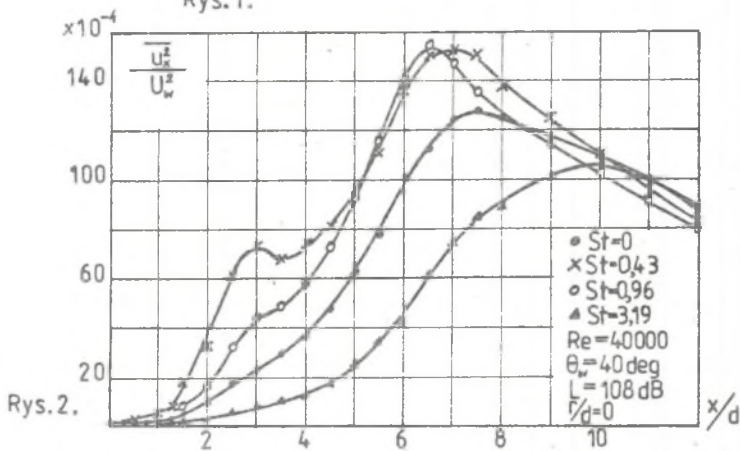
Z przedstawionego materiału doświadczalnego wynika, że pole akustyczne jest czynnikiem sterującym procesami wymiany pędu i ciepła w przepływach swobodnych i może je skutecznie zarówno intensyfikować, jak i osłabiać.

#### Literatura

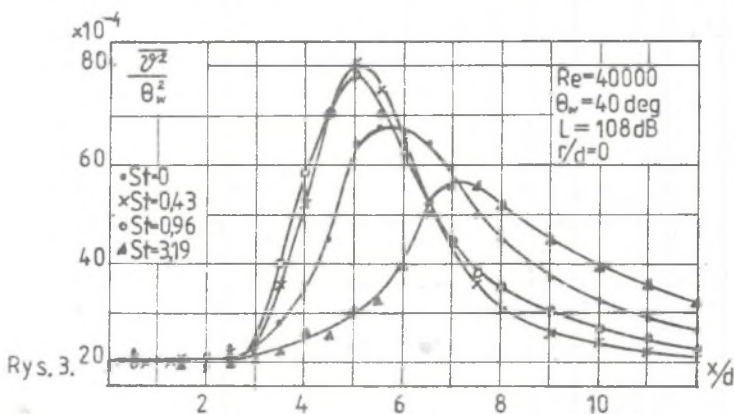
- [1] Ginevskij A.C., Vlasov E.V., Kolesnikov A.V.: Aeroakustičeskie vzaimodejstvia, Mašinostroenie, Moskwa, 1978.
- [2] Zaman K.M.B.M., Hussain A.K.M.F.: Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. Part 1. General jet response, J.Fluid Mech. vol 101, part 3, 1980.
- [3] Elsner J., Drobniak S.: Coherent structures of axisymmetric free jet, XVII Biennial Fluid Dynamics Symposium Spala, 1983.
- [4] Michalke A.: On the inviscid instability of the hyperbolic-tangent velocity profile. J.Fluid Mech., vol 19, 1964.
- [5] Rumynskij A.N., Senkevič M.: Vlijanie pulsacii potoka bolšoj amplitudy na teploobmen. Mechanika Židkosti i Gaza, 1975, 2.
- [6] Janik M.: Swobodna turbulentna struga izotermiczna w polu oddziaływań akustycznych. Praca doktorska, IMC, Politechnika Częstochowska 1983.
- [7] Janik M., Klajny R., Wolański R.: Ein Model der akustischen Wirkung auf die turbulent Strömung eines Axialsymmetrischen freistrahles. Turbulenzmodelle und ihre Anwendung in der Technik. Berlin 1982.



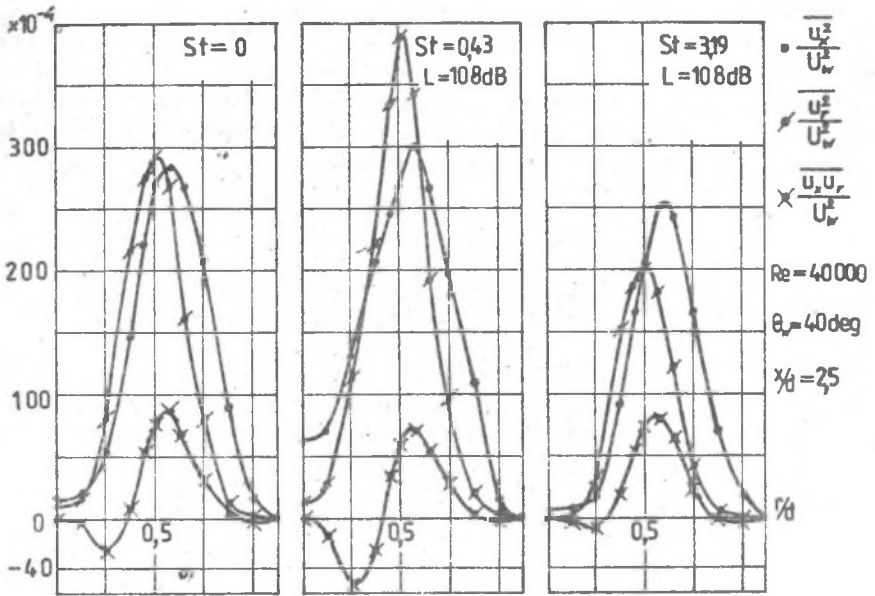
Rys. 1.



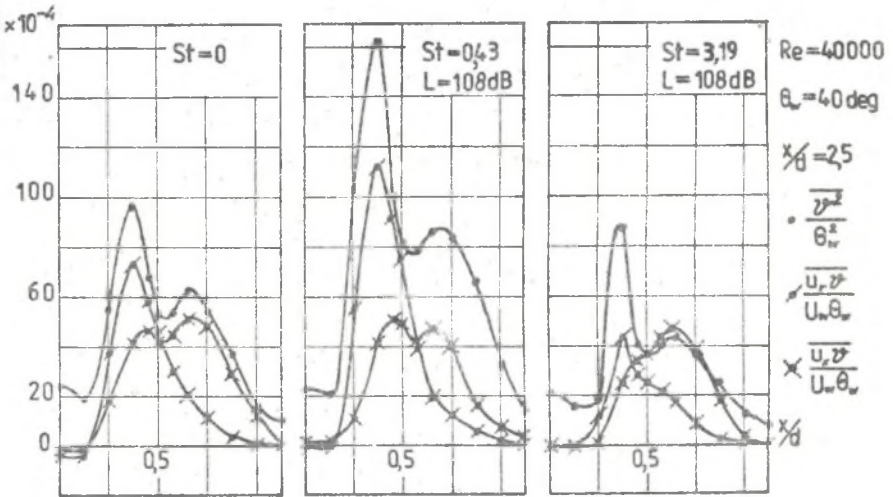
Rys. 2.



Rys. 3.



Rys. 4.



Rys. 5.

РАЗВИТИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ СТРУИ  
ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Р е з ю м е

В работе представлено модель течения в свободной струе воздуха при воздействии акустических волн. Приведено запоры аэродинамических и термических турбулентных параметров полученных экспериментально.

THE EVOLUTION OF TEMPERATURE FIELDS IN THE TURBULENT FREE JET  
UNDER THE CONDITION OF ACOUSTIC EXCITATION

S u m m a r y

The paper presents the model of the turbulent free air jet subjected to the acoustic excitation. The distributions of the turbulent flow - field parameters determined during the experiment have been presented in the paper.