ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКИ В РАБОЧИХ ЧАСТЯХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ

В.А. Лебига
ИТПМ СО РАН, Новосибирск, lebiga@itam.nsc.ru

Роль акустических возмущений в формировании течений при моделировании обтекания тел в аэродинамических трубах больших скоростей общепризнана, но механизмы такого влияния не всегда известны и могут быть определены. В значительной мере развитие возмущений в ламинарном пограничном слое и переход к турбулентному течению в пограничном слое на моделях, отрыв пограничного слоя и связанные с ними изменение трения и теплопередачи определяются свойствами внешних возмущений в рабочих частях аэродинамических труб и, в первую очередь, акустических пульсаций. Из трех возможных мод возмущений, турбулентности, температурной неоднородности и акустики, только последняя, как правило, оказывает наибольшее влияние на возникновение, развитие нестационарных процессов при обтекании моделей из-за малости других. В современных аэродинамических трубах предпринимаются эффективные меры, такие как хонейкомб, детурбулизирующие сетки, обеспечивающие низкий уровень турбулентности в форкамере, а высокая степень поджатия потока, приводит к тому, что в рабочих частях пульсации скорости пренебрежимо малы, как и температурная неоднородность, источники которой в обычных аэродинамических трубах отсутствуют. В то же время акустические возмущения присутствуют практически во всех аэродинамических трубах, но для разработки эффективных способов борьбы с этими возмущениями или учёта их влияния необходима информация об их источниках и структуре.

Поэтому детальные исследования структуры акустических возмущений необходимы по крайней мере по двум причинам: во-первых, для изучения влияния на упомянутые выше процессы, и, во-вторых, для создания методов если не для ликвидации акустических возмущений, то для управления и снижения до уровней, гарантирующих отсутствие их влияния на исследуемые процессы.

Целью данной работы является определение характеристик акустических пульсаций, достаточных для адекватного и полного их описания, позволяющего использование при математическом и экспериментальном моделировании процессов.

Основными параметрами, описывающими акустические процессы, являются интенсивность пульсаций, источники, спектральные характеристики, направление распространения волн (ориентация относительно вектора скорости потока) и т.д.

Инструментом, позволяющим получение наиболее полной информации, является термоанемометрия с использованием метода диаграмм пульсаций, предложенного Коважным, [1], и развитым для акустической моды в работах [2-4].

Уравнение диаграммы пульсаций, описывающим связь между выходным сигналом термоанемометра и параметрами акустики, можно записать, [3]:

$$\vartheta = \left|\alpha(\gamma-1)(1+\mathrm{M}\cos\chi) - r\left(1+\frac{\cos\chi}{\mathrm{M}}\right)\right|\langle\rho\rangle, \qquad (1)$$

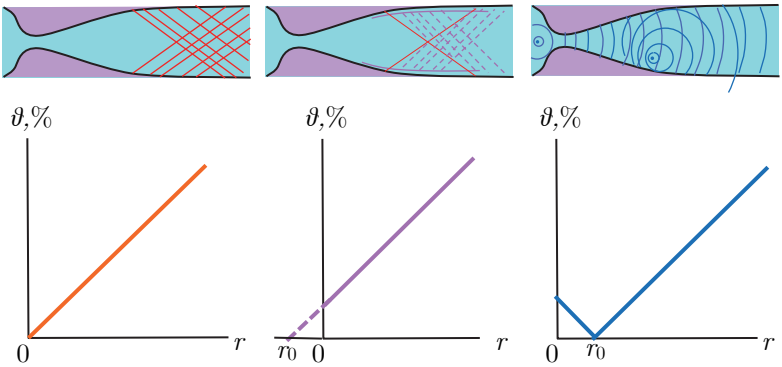
где ϑ – нормированная величина среднеквадратичного выходного напряжения на датчике термоанемометра, $r{=}F/G$ – отношение чувствительности датчика термоанемометра к массовому расходу F и температуры торможения G, $\langle\rho\rangle$ – среднеквадратичное значение пульсаций плотности, χ – угол между вектором скорости потока и нормалью к фронту звуковой волны, M – число Маха.

Можно предположить, что основным типом акустических возмущений в рабочих частях сверхзвуковых аэродинамических труб могут быть волны Маха, генерируемые мелкими дефектами стенок рабочей части. Эти волны хорошо наблюдаются при визуализации шлирен-методом, что позволило Коважному свести уравнение диаграммы пульсаций для акустической моды к виду

$$\vartheta = (1-\mathrm{M}^{-2})\langle\rho\rangle r \qquad (2)$$

так как в этом случае $\cos\chi = -\mathrm{M}^{-1}$, [1]. На рис. 1а показана диаграмма пульсаций, соответствующая стационарным волнам Маха. Такой вид диаграммы не соответствовал полученным экспериментальным данным, в которых диаграмма не проходила через начало координат. В работе [2] Лауфер показал, что главным источником акустических возмущений являются пульсации в турбулентном пограничном слое на стенках рабочей части, максимальная величина которых соответствует слою, движущимся со

скоростью M_s, при этом $(M–M_s)>1$, следовательно $\cos\chi=-(M–M_s)^{-1}$. В этом случае диаграмма имеет вид *b*), рис. 1.



a) $\cos\chi=-M^{-1}$, [1] *b*) $\cos\chi=-(M–M_s)^{-1}$, [2] *c*) $-M^{-1}<\cos\chi\leq 1$, [3]

Рис. 1. Типы акустических возмущений

В работе [3] было показано, что в сверхзвуковом потоке могут присутствовать и звуковые волны, источники которых находятся в форкамере либо распространяются в пограничном слое с дозвуковой скоростью, $(M–M_s)<1$. Такие звуковые волны описываются уравнением (1), им соответствует график *c*) на рис. 1. Таким образом, признаком типа акустических возмущений является значение r_0 – абсцисса диаграммы пульсаций, при которой диаграмма, либо её продолжение, обращается в ноль.

График зависимости $r_0(M)$ для рассмотренных акустических возмущений дан на рис. 2. Диаграммам, показанным на рис. 1a и 1b соответствует область *Ia*, а показанным на рис. 1c – область *Ib*. Значения r_0, соответствующие данным Коважного [1] для стационарных и Лауфера [2] для генерируемых волн Маха турбулентным пограничным слоем, также приведены на рис. 2.

В отличие от сверхзвуковых, в рабочих частях дозвуковых аэродинамических труб вне зависимости от места расположения источников имеют место только звуковые волны, для которых также справедливо уравнение (1). В то время как при $M>1$ область значений r_0 односвязна, соответствующие значения r_0 при $M<1$ расположены в двухсвязной области *II* и *III*, см. рис. 2.

На рис. 2 нанесена также кривая $\beta(M)$, соответствующая значению r_0 для вихревой моды (турбулентности). Важно, что эта

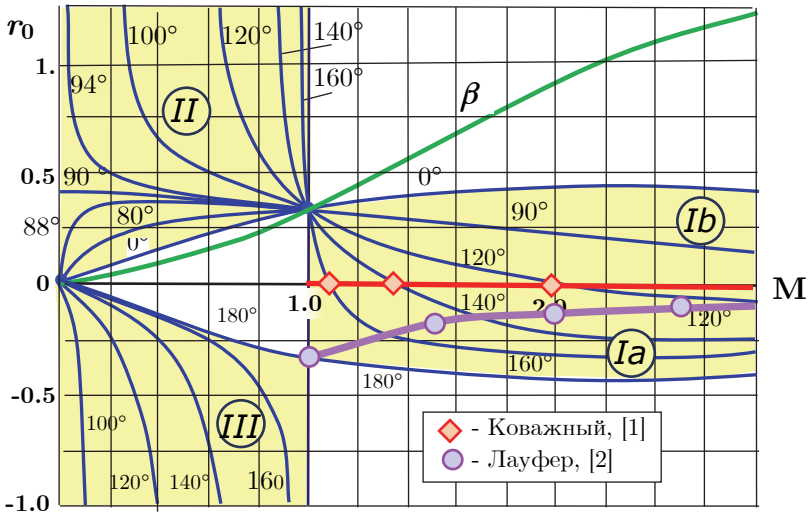


Рис. 2. Зависимость r_0(M) для акустических возмущений

кривая не проходит через области расположения r_0 для акустической моды, что позволяет различать диаграммы мод, соответствующих пульсациям давления вследствие пульсаций скоростного напора (гидродинамические) и акустические.

В потоке одновременно могут присутствовать возмущения разного типа. В большинстве случаев для разных участков спектров есть преобладающие типы возмущений. Применение диаграмм пульсаций для узких полос частот можно использовать для идентификации типов возмущений и управлении ими.

Литература

1. L.S.G. Kovasznay. The Hot-Wire Anemometer in Supersonic Flow. J.A.S., 1950, vol. 17, No 9, pp. 565–572.
2. J. Laufer. Aerodynamic Noise in Supersonic Wind Tunnels. J.A.S. 1961. vol. 28. No 9. pp. 685–692.
3. В.А. Лебига. Термоанемометрия сжимаемых потоков. Новосибирск. Изд-во НГТУ, 1997. 81 с.
4. В.А. Лебига, В.Н. Зиновьев, А.Ю. Пак. Применение термоанемометра для измерения характеристик акустических волн, распространяющихся в сжимаемых потоках. Теплофизика и аэромеханика. 2002. №3, с.339–349.