

УДК 533.6.071

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ В ТРАНСЗВУКОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

© 2011 г.

В.А. Лебига

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

lebiga@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

На основе развитого авторами термоанемометрического метода исследованы возмущения в рабочих частях трансзвуковых аэродинамических труб. С помощью диаграмм пульсаций получены данные об интенсивности и спектрах мод пульсаций (вихревой, энтропийной, акустической). Показано, что в аэродинамических трубах периодического действия преобладающий вклад вносят акустические волны, генерируемые проницаемыми стенками. Для аэродинамических труб с замкнутым контуром наиболее существенны сносимые в рабочую часть температурные неоднородности, создаваемые в тракте трубы при впрыске и испарении жидкого азота либо из-за диссипации механической энергии от вентилятора.

Ключевые слова: термоанемометр, трансзвуковая аэродинамическая труба, моды пульсаций, акустика, температурная неоднородность.

Введение

В большинстве случаев в рабочих частях аэродинамических труб (АДТ) больших скоростей содержатся пульсации трех типов: вихревые, энтропийные и акустические. Природа и происхождение этих пульсаций могут быть самыми различными: вихревые возникают при обтекании элементов конструкции внутри контура АДТ, энтропийные – при наличии теплообмена между потоком и элементами конструкции, а акустические генерируются как отрывными и сдвиговыми течениями, так и отверстиями, уступами и впадинами, кавернами и т.д.

Если вихревые и энтропийные возмущения переносятся непосредственно со скоростью потока, то акустические пульсации могут распространяться в любом направлении.

Измерения выполнялись с помощью термоанемометров постоянного тока с частотным диапазоном до 200 кГц, а для интерпретации полученных данных использовался предложенный Л. Коважным метод диаграмм пульсаций [1], развитый авторами для трансзвуковых скоростей потока [2, 3].

Пульсации в рабочих частях прямооточных трансзвуковых аэродинамических труб

При наличии большой степени поджатия потока на входе в рабочую часть доля сноси-

мых из форкамеры возмущений сравнительно мала, поэтому в рабочих частях АДТ периодического действия в основном присутствуют акустические пульсации, генерируемые непосредственно в рабочей части.

Основные результаты были получены для чисел Маха 0.5–1.1 в АДТ Т-325 ИТПМ СО РАН, внутренний контур которой аналогичен Т-125 ЦАГИ, а стенки рабочей части имеют либо щели, либо дырчатую перфорацию постоянной степени проницаемости. Диаграммы пульсаций, измеренные на оси рабочей части с дырчатой и щелевой перфорацией, показали, что преобладающими являются акустические возмущения, генерируемые щелями или отверстиями перфорации, при этом в большей части диапазона скоростей интенсивность возмущений для щелевых стенок в 2.5–3 раза ниже, чем для дырчатой перфорации [4]. Измерения в АДТ Т-325М ИТПМ СО РАН показали, что для переменной проницаемости стенок, обеспечиваемой переменным профилем щелей либо плавно увеличивающимися отверстиями перфорации, различие между этими типами перфорации не столь заметно, см. [4].

Измерения пульсаций в рабочей части прямооточной АДТ периодического действия ТWT Аэрокосмического научно-технического исследовательского центра Национального Ченг-Кунг университета (ASTRC NCKU), Тайвань, находятся в качественном соответствии с приведенными данными [5].

Измерение пульсаций в аэродинамических трубах непрерывного действия

Результаты исследований пульсаций в АДТ непрерывного действия с замкнутым контуром приводятся на примере криогенной трансзвуковой аэродинамической трубы РЕТВ (Кельн, Германия) [6]. Для проведения измерений были разработаны и изготовлены дистанционно управляемые термоанемометры постоянного тока, позволяющие проводить измерения при длине кабеля до 50 м.

Методика тарировки датчиков и обработки результатов была адаптирована для условий экспериментов (низкие температуры, трансзвуковые скорости и т.д.). Испытания проведены в диапазоне чисел Маха от 0.2 до 0.8 и температур торможения от 120 до 270 К при нескольких значениях полного давления. Результаты измерений представлялись в виде диаграмм пульсаций, спектров сигнала термоанемометра.

Проведен анализ модового состава пульсаций (турбулентность, температурная неоднородность, акустика). Получено, что преобладающий вклад в выходной сигнал термоанемометра вносит температурная неоднородность. Доля вихревых возмущений становится заметной в области частот выше 500 Гц. Акустические пульсации обнаружены на дискретных частотах, связанных с вращением приводного вентилятора.

Было установлено, что фактором, определяющим интенсивность пульсаций массового расхода $\langle m \rangle$ и температуры торможения $\langle T_0 \rangle$, является температура торможения потока: пульсации массового расхода увеличиваются с понижением температуры. При этом в пределах разброса экспериментальных данных число Маха не оказывает заметного влияния на относительную интенсивность пульсаций массового расхода. Аналогичный вывод можно сделать и о зависимости пульсаций (относительной неоднородности) температуры торможения потока от средней температуры торможения потока.

В то же время абсолютные значения неоднородности температуры торможения ΔT_0 практически не зависят от температуры потока и находятся в пределах 0.2–0.3 К. Это дает основание предполагать, что и пульсации массового расхода, и пульсации температуры торможения вызваны впрыском жидкого азота, последующим испарением и диссипацией возмущений в тракте криогенной аэродинамической трубы. Помимо диаграмм осредненных характеристик пульсаций и осредненных характеристик возмущений, в рабочей части РЕТВ для всех режимов были получены частотные спектры пульсаций, в которых можно выде-

лить на две области – низкочастотную и высокочастотную с условной границей между ними около 500 Гц. Диаграммы пульсаций для низкочастотной части спектра представляют собой диаграммы типичной энтропийной моды, что свидетельствует о преобладающих температурных возмущениях. Максимальные амплитуды имеют место при частотах около 10 Гц, что соответствует периоду обращения рабочего газа в тракте РЕТВ, и эти пульсации можно соотнести с возмущениями, вызванными впрыском жидкого азота и последующими распадом и диссипацией температурных неоднородностей.

Вид диаграммы пульсаций для высокочастотной части спектра указывает на некоторый вклад пульсаций скорости (вихревой моды). При этом амплитуды выходного сигнала для высокочастотной части спектра значительно ниже, чем для низкочастотной. Также были обнаружены интенсивные пики в спектрах выходного сигнала термоанемометра на разных частотах в несколько килогерц, зависящих от скорости.

Для выяснения природы этих возмущений были получены диаграммы пульсаций в узких полосах частот, содержащих пики. Все диаграммы имели *V*-образную форму, которая соответствует акустическим волнам, распространяющимся в направлении потока, а частоты этих возмущений соответствуют частотам, равным произведению числа оборотов вентилятора на количество лопаток.

Следует отметить, что температурные неоднородности могут быть существенными и в некриогенных АДТ с замкнутым контуром, например Т-128 ЦАГИ, из-за диссипации механической энергии, передаваемой потоку приводным вентилятором.

Заключение

Выполненные исследования характеристик пульсаций в трансзвуковых аэродинамических трубах разного типа позволяют сделать вывод, что: для трансзвуковых аэродинамических труб прямого типа характерными являются пульсации акустической природы из-за наличия перфорированных стенок рабочей части; доминирующим типом пульсаций в аэродинамических трубах замкнутого типа являются температурные неоднородности, вызванные либо впрыском охладителя, либо диссипацией механической энергии, передаваемой вентилятором потоку. В криогенной аэродинамической трубе абсолютные значения температурной неоднородности

родности практически постоянны для всех исследованных режимов по числам Маха, Рейнольдса, температуры торможения. В исследовании принимали участие В.Н. Зиновьев, А.Ю. Пак.

Результаты в криогенной аэродинамической трубе РЕТВ (Кельн, Германия) получены в рамках проекта TELFONA (контракт ЕС AST4-СТ-2005-516109).

Список литературы

1. Kovaszny L. // J.A.S. 1950. V. 17. No 9. P. 565–572.
2. Лебига В.А. // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1991. №6. С. 160–167.
3. Лебига В.А., Зиновьев В.Н., Пак А.Ю. // Аэромеханика и газовая динамика. 2003. №4. С. 53–70.
4. Зиновьев В.Н., Лебига В.А. // Ученые записки ЦАГИ. 2010. Т. XLI, №4. С. 11–18.
5. Lebiga V.A., Zinoviev V.N., Chung K.-M., Miao J.-J. // Transaction of the Aeronautical and Astronautical Society of the Republic of China. 2004. Vol. 36. No 2. P. 115–124.
6. Lebiga V.A., Zinoviev V.N., Pak A.Yu. // ICMAR'2010. Novosibirsk, Russia, 2010. Part II. P. 153–154.

FEATURES OF FLUCTUATIONS IN TRANSONIC WIND TUNNELS

V.A. Lebiga

Fluctuations in test sections of transonic wind tunnels have been investigated with the help of the hot-wire technique, developed by the authors. The data on the intensity and spectra of fluctuation modes (vorticity, entropy, acoustic) were obtained using the approach of the fluctuation diagrams. It is shown that acoustic waves generated by permeable walls make dominant contribution into fluctuations in blow-down wind-tunnels. The main part of disturbances in transonic wind tunnels with closed circuit results from the temperature non-uniformities due to the injection and evaporation of liquid nitrogen or due to the dissipation of mechanical energy from the fan.

Keywords: hot-wire, transonic wind tunnel, modes of fluctuations, acoustics, temperature nonuniformities.