

УДК 533;534.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМА ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

© 2011 г.

С.А. Чепрасов, А.Н. Секундов

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

cheprasov_ciam@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассмотрены два метода моделирования шума турбулентных выхлопных струй. Первый метод основан на решении осредненных уравнений Навье–Стокса (RANS), замкнутых с помощью двухпараметрической модели турбулентности « k – ϵ » и использовании полуэмпирических соотношений для расчета спектра и диаграммы направленности. Второй метод основан на численном решении нестационарных уравнений Навье–Стокса методом крупных вихрей (LES) и использовании интегрального решения волнового уравнения (формула Кирхгофа или FWH). Приведены результаты численных расчетов нескольких турбулентных струйных течений и сопоставлены с экспериментальными данными. Анализируются возможности и погрешности обоих методов.

Ключевые слова: турбулентные струи, шум, методы расчета.

Выхлопные струи гражданских самолетов по-прежнему создают значительную часть общего шума самолета. Это связано с тем, что шум вентиляторов в последние годы удалось снизить весьма значительно, а шум струй существенно уменьшить пока не удалось.

Несмотря на успехи моделирования турбулентности и развитие аэроакустики, точный расчет характеристик шума струйных течений по-прежнему остается трудной задачей. Многие годы в рамках классической аэроакустики предпринимались попытки разработки волнового уравнения с источниками членами на базе линеаризованных уравнений Эйлера [1–6]. К сожалению, эти классические подходы не привели к созданию надежного и универсального метода расчета шума струй. Некоторые объяснения принципиальных причин этой неудачи есть, например, в работах [7, 8]. Упомянутые принципиальные трудности связаны, в частности, с невозможностью строгого выделения акустических пульсаций плотности (или давления) на фоне присутствующих в турбулентном потоке вихревых и энтропийных возмущений. С этим связано и то многообразие вариантов записи волнового уравнения, которое встречается в указанных работах.

Не удалось преодолеть и значительные чисто математические проблемы, например при нахождении явного выражения для функции Грина в случае реальных струйных течений. Поэтому в данной работе будут рассмотрены два других подхода к моделированию шума тур-

булентных струй. Первый из них основан на расчетах осредненных характеристик струи (RANS). В этом подходе используются модельные уравнения двухпараметрической турбулентности, ряд приближенных полуэмпирических соотношений, а спектры шума вычисляются в виде интеграла по объему струи. Идеи такого подхода впервые были заложены в работах [9, 10]. А более современная версия кратко описана в [11].

Альтернативный и потенциально более точный подход для расчета шума основан на прямом численном методе моделирования крупных вихрей в турбулентной струе (метод LES), использовании поверхности Кирхгофа и интегральной формы волнового уравнения (например, FWH) в дальнем акустическом поле вне струи [12–14]. Именно этим двум подходам посвящены настоящие исследования, в которых авторы пытаются выяснить возможности и ограничения указанных методов расчета шума выхлопных струй.

Метод, основанный на решении осредненных уравнений (RANS)

В работах [9, 10] было сделано предположение о том, что шум струи можно представить как суперпозицию (интеграл) множества локальных источников шума. При этом предполагается, что каждый такой источник имеет свою интенсивность Q , свой спектр $\Phi(\omega/\omega_s)$ и свою диаграмму направленности $D(\theta, \varphi, M)$. Здесь $\omega \equiv 2\pi f$ – частота, $\omega_s \approx \epsilon/k$ – характерная

частота, зависящая от параметров турбулентности (диссипации ε и энергии k), θ и φ – полярный и азимутальный углы направления на микрофон, M – акустическое число Маха. Источниковый член Q записывается в виде суммы трех слагаемых. Первое слагаемое, пропорциональное M^5 , отвечает за шум однородной турбулентности и содержит множитель $F(\Omega)$, описывающий влияние продольной завихренности Ω потока за элементами шумоглушения. Второе слагаемое характеризует так называемый «сдвиговый» шум. Последнее слагаемое пропорционально M^3 и связано с генерацией дипольного шума пульсациями температуры (плотности). Для того чтобы учесть эффекты трехмерности поля шума (азимутальная асимметрия), используется эмпирическое соотношение, основанное на результатах специальных экспериментов, в которых определялась относительная акустическая «прозрачность» струи.

Предложенная модель была многократно протестирована путем сравнения рассчитанного и измеренного шума. Среди этих сравнений круглая горячая и холодная одиночные затопленные струи; струи, истекающие из сопел с шевронами и лепестками; трехмерные струи двухконтурных сопел в условиях старта и взлета. Эти тесты показали, что данный подход дает возможность вычислять спектры и диаграммы направленности шума струй реальной конфигурации с погрешностью менее 2–4 дБ.

Прямой численный метод расчета шума струи

Разрабатываемые в последнее десятилетие методы прямого численного моделирования шума струи дают обнадеживающие результаты [12–15]. Однако точность расчета с помощью этого метода ограничивается возможностями современных компьютеров. Основной проблемой численных расчетов является точное описание турбулентного пограничного слоя на стенках сопла и последующего образования за кромкой слоя смешения. Специальные расчеты, выполненные в данной работе, показали, что значительная часть спектра (при числах Струхала более 1–2) генерируется первыми двумя диаметрами струи. Эта область течения определяет высокочастотный шум авиационных выхлопных струй, который играет важную роль при нормировании допустимого шума самолетов в окрестности аэропортов.

Расчеты [12–15] и оценка [16] показывают, что для точного моделирования турбулентного пограничного слоя на внутренней стенке даже

простейшего круглого сопла необходимо использовать расчетную сетку, содержащую более 10^9 узлов, что находится на пределе возможностей современной вычислительной техники. Описание же более сложных конфигураций сопел вообще выходит за пределы возможностей современных компьютеров. Поэтому в данном исследовании предлагается использовать приближенные методы описания течения вблизи кромки сопла. В частности, рассмотрено несколько вариантов искусственных турбулизаторов на внутренней стенке сопла. Прямые трехмерные численные расчеты с использованием интерцептора и каверны показали перспективность этого направления. Однако анализ известных работ и расчетов авторов показывает, что точность предсказания спектрального шума струи на данном этапе развития этого метода не превышает 2–3 дБ.

Работа выполнена при участии К.Я. Якубовского.

Авторы выражают благодарность за полезное обсуждение работы S.F. Birch и Д.А. Любимову.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (№ 10-01-00255-а) и Московского Научно-Технического Центра компании «Боинг».

Список литературы

1. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1946. С. 208.
2. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. I. General theory // Proc. Roy. Soc. 1952. Vol. 216. P. 564–587.
3. Lilley G.M. On the noise from jets, noise mechanisms. 1974. AGARD CP-131.
4. Ffowcs Williams J.E., Hawking D.L. Sound generation by turbulence and surfaces // Philos. Trans. of Roy. Soc. of London. Series A. 1969. Vol. 264, No 1151. P. 321–342.
5. Goldstein M.E. Aeroacoustics. New York: McGraw-Hill, 1976. 305 p.
6. Ribner H. Effect of jet flow on jet noise via an extension to the Lighthill model // J. Fluid Mech. 1996. Vol. 321. P. 1–24.
7. Fedorchenko A.T. On some fundamental flaws in present aeroacoustic theory // Journal of Sound and Vibration, 2000. Vol. 234, No4. P. 719–782.
8. Khritov K.M. et al. On the Prediction of Turbulent Jet Noise Using Traditional Aeroacoustic Methods // Intern. Journal of Aeroacoustics. 2005. Vol. 4, No3-4. P. 288–323.
9. Мунин А., Кузнецов В., Леонтьев Е. Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. С. 248.
10. Довжик С.В., Крашенинников С.Ю., Мионов А.К. Метод локальных источников для расчета шума турбулентной дозвуковой струи // Газовая динамика / Под ред. А.Н. Крайко. 2001. Т. 2. С. 329–331.
11. Secundov A.N., Birch S.F., Tucker P.G. //

Propulsive jets and their acoustics. Phil. Trans. R. Soc. A. 2007. Vol. 365. P. 2443–2467.

12. Shur M.L. et al. Further Steps in LES Based Noise Prediction for Complex Jets // AIAA Paper 2006-485. 2006.

13. Bodony D.J., Lele S.J. Current status of jet noise predictions using large-eddy simulation // AIAA Journal. 2008. Vol. 46, No2. P. 364–380.

14. Cheprasov S.A. et al. Computational modeling of the flow and noise for 3-D exhaust turbulent jets //

Computational Fluid Dynamics 2010: Proc. Sixth Intern. Conf. on Computational Fluid Dynamics. ICCFD6. St.-Petersburg, Russia, on July 12–16. 2010.

15. Uzun A., Hussaini M.Y. High-fidelity numerical simulations of a round nozzle jet flow. AIAA Paper 2010-4016. 2010.

16. Любимов Д.А. Разработка и применение эффективного RANS/ILES-метода для расчета сложных турбулентных струй // ТВТ. 2008. Т. 46, №2. С. 271.

TURBULENT JET NOISE SIMULATION

S.A. Cheprasov, A.N. Secundov

Two methods of simulation of turbulent jet noise are considered. The first method is based on RANS approach with « $k-\epsilon$ » turbulence model flow calculations and uses approximate semi-empirical relations to calculate jet noise. An alternative method is based on the use of LES jet flow calculations, combined with the concept of Kirchhoff surface and some integral form of the acoustic wave equation (FWH equation). Results of the simulation of jet noise are presented, and compared with experimental data. The potential and drawbacks of both the approaches are analyzed.

Keywords: turbulent jets, noise, simulation methods.