

Аэроакустика: решение за суперкомпьютерами и инновационными алгоритмами



5 Аэроакустика: решение за суперкомпьютерами и инновационными алгоритмами

Конкуренция авиаперевозчиков непрерывно растет с увеличением числа перевозимых пассажиров. Критическим звеном в этой конкурентной борьбе является снижение уровня шума магистральных лайнеров. Разработка эффективных мер, уменьшающих уровень звукового загрязнения окружающей среды воздушными судами, невозможна без привлечения математического моделирования, базирующегося на использовании суперкомпьютеров и вычислительных алгоритмов нового поколения.

Аэроакустика — раздел механики жидкости и газа, изучающий генерацию и распространение звука, возникающего при истечении воздушного потока и его взаимодействии с твердыми границами, например, лопастями вентилятора компрессора или подвески двигателя к крылу самолета (пилона). Задача оптимизации аэроакустических характеристик различных конструкций является особенно острой для авиационной промышленности в связи с ужесточением контроля за уровнем шума в зоне аэропортов в большинстве стран Европы и Америки. Актуальность проблемы снижения шума в будущем будет нарастать и далее в связи с прогнозируемым увеличением воздушных перевозок к 2020 году в два раза. Естественно, что ужесточение международных норм по шуму также необходимо учесть и при планировании будущих инновационно-технологических прорывов в авиационном комплексе России.

По сравнению с классической газовой динамикой акустические задачи отличаются повышенной степенью сложности. Одна из проблем при их решении заключается в большом разбросе характерных масштабов, возникающих в задачах, связанных с генерацией и переносом звука. Характерный размер акустических волн в воздухе на несколько порядков превышает размер аэродинамических пульсаций, отвечающих за перенос наибольшей механической энергии. Другая сложность в том, что во многих случаях аэродинамические пульсации обладают низким акустическим КПД. Например, акустическая энергия турбулентной струи составляет всего лишь около одной миллионной кинетической энергии струи на выходе из сопла. Дело в том, что акустические колебания — далеко не единственная и, зачастую, далеко не самая большая по амплитуде часть решения уравнений газовой динамики. В решении таких уравнений существенна «гидродинамическая» часть, которая на перенос звука непосредственно не влияет. Примерами последней в струях являются волны энтропии и завихренности, которые сами по себе звука не переносят, но вносят значительный вклад в пульсации поля струи.

Также спецификой методов математического моделирования, использующихся в инженерных задачах аэроакустики, является необходимость получения решения не только в пределах допустимой точности внутри потока (аэродинамических источников звука), но и на больших расстояниях от него. В этой ситуации особую важность приобретают гибридные подходы математического моделирования, основанные на декомпозиции модели на блоки, для решения каждого из которых применяются оптимальные подходы. В рамках подхода акустической аналогии Лайтхилла, являющейся одним из способов такой декомпозиции, полная нелинейная задача, описываемая в рамках уравнений

АВТОРЫ:

В.М. Головизнин – докт. физ.-мат. наук., профессор, зав. отделом ИБРАЭ РАН (Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН),
e-mail: gol@ibrae.ac.ru

М.А. Зайцев – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИБРАЭ РАН,
С.А. Карбасов – старший научный сотрудник, Технический факультет Кембриджского университета, Великобритания,
e-mail: sak36@cam.ac.uk

В.Г. Кондаков – младший научный сотрудник ИБРАЭ РАН,
e-mail: kondakov_vasily@inbox.ru

В.Ф. Копьев – докт. физ.-мат. наук., профессор, начальник НИО-9 ЦАГИ,
e-mail: vkopiev@mktsagi.ru

В.А. Семилетов – научный сотрудник, Технический факультет Кембриджского университета, Великобритания,
e-mail: vs346@cam.ac.uk

Г.А. Фараносов – канд. физ.-мат. наук, инженер НИО-9 ЦАГИ,
e-mail: aeroacoustics@mktsagi.ru

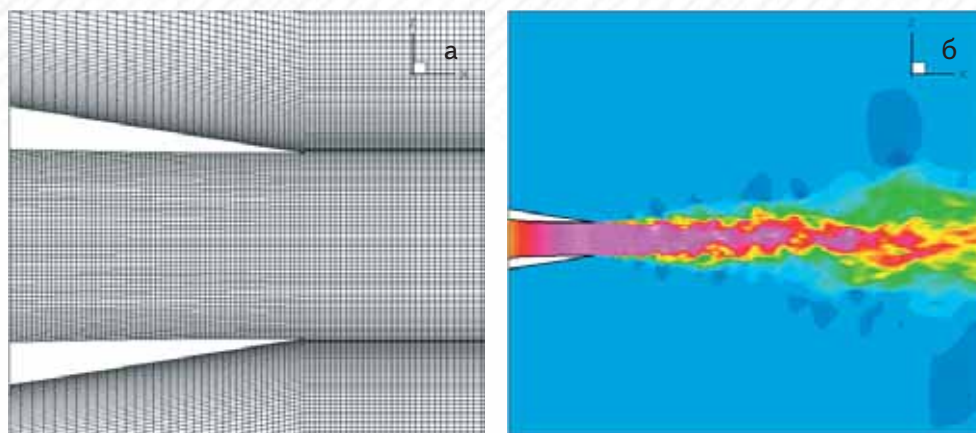


Рис. 1. Расчетная сетка в сечении симметрии сопла со сгущением в слое смешения (а) и мгновенное распределение осевой компоненты скорости (б) для расчета истечения дозвуковой высокоскоростной струи из конического сопла (эксперимент JEAN)

Навье-Стокса, разбивается на задачу о нахождении нелинейного акустического источника и на линейную задачу расчета звукопереноса от этого источника, например, заданного на некоторой контрольной поверхности (Фокса Уильямса — Хоукинга, FWH), окружающей поток.

В любом случае без принятия дополнительных мер ошибки, допустимые в аэродинамических расчетах по порядку величины, вполне могут оказаться больше чем составляющая решения, влияющая на акустику. Такими дополнительными мерами является использование вычислительных алгоритмов повышенной разрешающей способности и большого сеточного разрешения. Привлечение супервычислительных технологий также позволяет проводить расчеты на основе первых принципов, т.е. без использования эмпирических моделей турбулентности, на основе метода крупных вихрей (LES).

Ниже представлены результаты расчета, полученные коллективом авторов с использованием кода MILES (Monotonically Integrated LES) на основе схемы КАБАРЕ, сопряженного с методом FWH для расчета звука на больших расстояниях от аэродинамического потока. Представленные результаты соответствуют расчетам на британском суперкомпьютере ГЕКТОР и российском «Ломоносов». В расчетах стуй использовались сетки в диапазоне 1–3 млн узлов, в расчете обтекания профиля NACA — сетки 5–10 млн узлов. Количество задействованных в расчетах ядер составляло 500–1000. Это количество

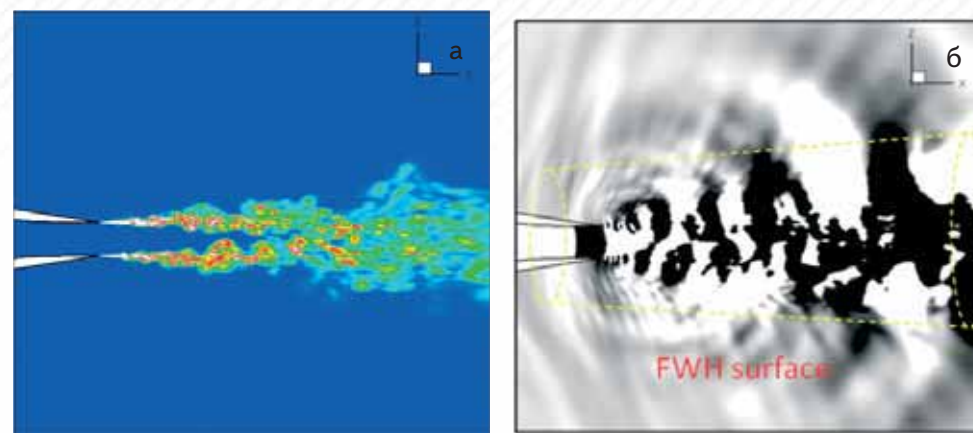


Рис. 2. Мгновенное распределение завихренности (а) и давления в акустическом диапазоне, где также показано примерное расположение контрольной акустической поверхности для сопряженного расчета дальнего поля (б) в плоскости симметрии сопла для расчета истечения дозвуковой высокоскоростной струи (эксперимент JEAN)

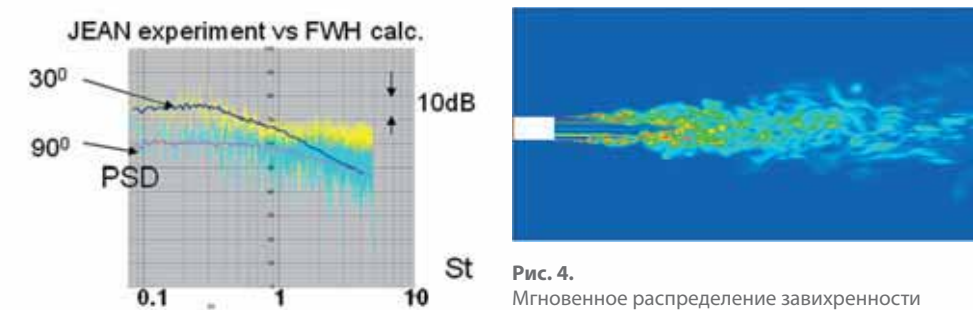


Рис. 3. Сравнение спектральной мощности звука (PSD), полученной из расчета (FWH) с экспериментальными данными (JEAN) для различных частот ($St = f \cdot D / U$) и углов относительно положения наблюдателя к струе

Рис. 4. Мгновенное распределение завихренности в плоскости симметрии для расчета истечения дозвуковой высокоскоростной горячей струи из двухконтурного сопла с длинной рубашкой внешнего контура (long cowl nozzle)

отвечает приемлемому ускорению кода КАБАРЕ в данном диапазоне размера задач и примерно 2–3 суткам астрономического времени расчета на суперкомпьютере.

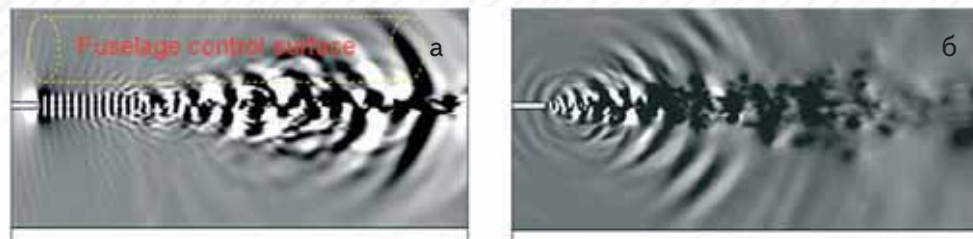


Рис. 5. Мгновенное распределение давления в акустическом диапазоне в плоскости симметрии для расчета истечения дозвуковой высокоскоростной горячей струи из двухконтурного сопла с длинной рубашкой внешнего контура (long cowl nozzle) в круизном режиме, где показано примерное расположение поверхности фюзеляжа (а), и в стартовом режиме (б)

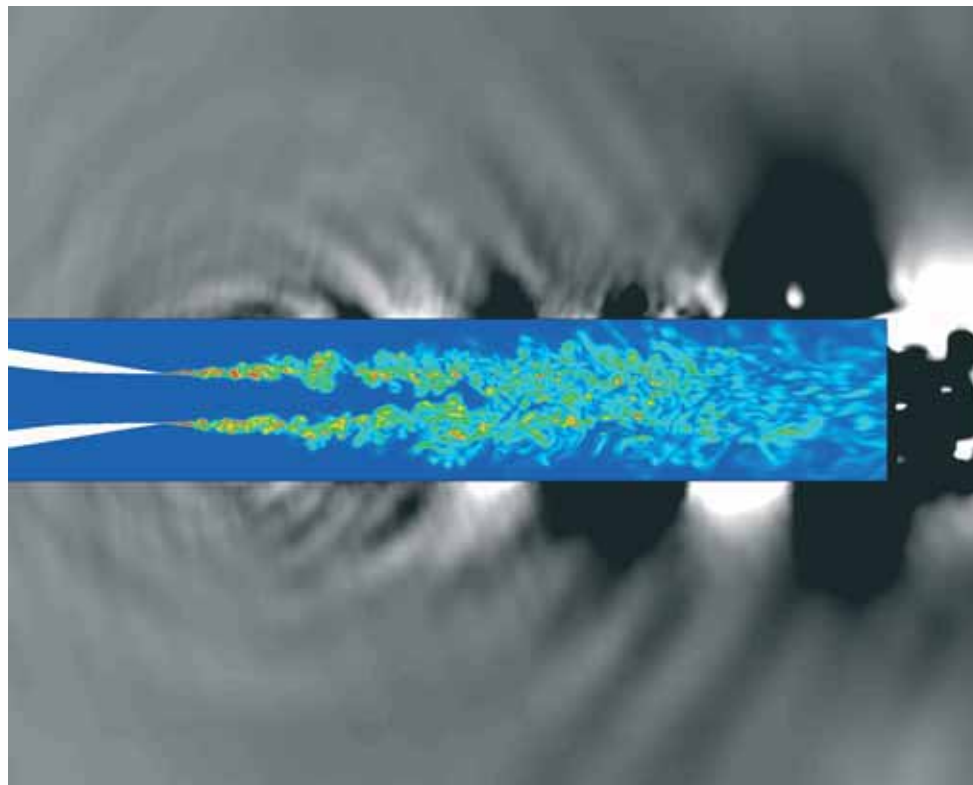


Рис. 6. Мгновенное поле завихренности и распределение пульсаций акустического давления дозвуковой турбулентной струи эксперимента JEAN из расчета по методу КАБАРЕ на сетке 7,8 млн ячеек с разрешением тонкого слоя смешения на выходе из конического сопла

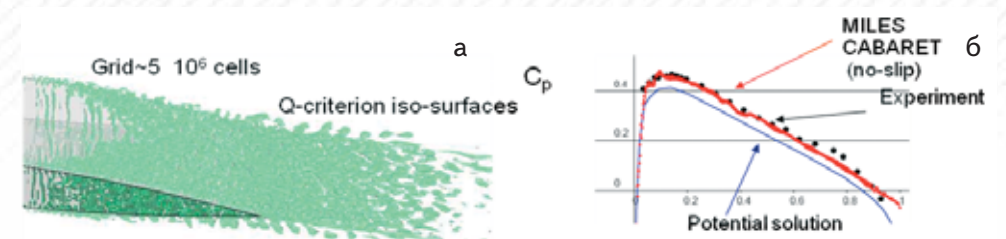


Рис. 7. Мгновенное распределение крупных вихрей (ответающее изоповерхности завихренности в Q-норме) в окрестности задней кромки профиля (а) и сравнение рассчитанного коэффициента давления (C_p) с экспериментальными данными и результатами расчета на основе теории потенциального обтекания для задачи об обтекании профиля NACA0012 дозвуковым потоком при нулевом угле атаки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головизнин В.М. Разностная аппроксимация конвективного переноса с пространственным расщеплением временной производной / В.М. Головизнин, А.А. Самарский // Математическое Моделирование, 1998 год. – Том 10. – №1. – С. 86–100.
2. Головизнин В.М. Балансно-характеристический метод численного решения одномерных уравнений газовой динамики в эйлеровых переменных // Математическое моделирование, 2006. – Т. 18. – № 11. – С. 14–30.
3. Karabasov S.A., Goloviznin V.M. New Efficient High-Resolution Method for Nonlinear Problems in Aeroacoustics // AIAA Journal, 2007. – Vol. 45. – No. 12. – Pp. 2861–2871.
4. Karabasov S.A., Goloviznin V.M. Compact Accurately Boundary Adjusting High-Resolution Technique for Fluid Dynamics // J. Comput.Phys., 2009. – 228. – Pp. 7426–7451.
5. Karabasov S.A. Understanding Jet Noise, Phil. Trans. of R. Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, August 13, 2010. – 368 – Pp. 3593–3608, doi: 10.1098.
6. Power O., Kerherve F., Fitzpatrick J., Jordan P., Measurements of turbulence statistics in high subsonic jets // AIAA-2004-3021, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, June 2004.
7. Garcia-Sagrado A., Hynes T., Hodson H. Experimental Investigation Into Trailing Edge Noise Sources, Proceedings of the 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Cambridge, Massachusetts, 2006.
8. Кондаков В.Г., Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Копьев В.Ф., Фараносов Г.А. Вычислительный комплекс на основе схемы КАБАРЕ для численного моделирования турбулентных струй: Расчет пульсаций в ближнем поле (часть I), Расчет акустических характеристик в дальнем поле (часть II), Всероссийская открытая конференция по авиационной акустике, 27–30 сентября 2011, Звенигород.