

УДК 629.735.036.34:004.3'122(045)

М. И. КИСЛЯК*(Национальный авиационный университет,
г. Киев),***М. М. МИТРАХОВИЧ**, доктор технических наук,
профессор*(ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье)*

Использование акустических моделей при расчете ступени вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя

Произведено сравнение экспериментальных акустических показателей вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя с показателями, которые получены путем моделирования с использованием различных акустических моделей.

Ключевые слова: Fluent, CFD, лопатка, ступень, вентилятор, модель турбулентности, акустическая модель, турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД).

Виконано порівняння експериментальних акустичних показників вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД) з показниками, що отримані шляхом моделювання з використанням різних акустичних моделей.

Ключові слова: Fluent, CFD, лопатка, ступінь, вентилятор, модель турбулентності, акустична модель, ТРДД.

Основными экологическими проблемами авиации являются шум самолета и силовой установки, а также выхлопные газы двигателя. Для решения задач оценки уровня шума используют различные подходы, в том числе и компьютерное моделирование, которое позволяет оценивать влияние различных факторов на уровень шума [1].

В современном комплексе ANSYS есть возможность исследовать акустические характеристик элементов двигателя, используя разные акустические модели [2]. Важное значение при использовании различных моделей имеют исходные данные при постановке задачи. Так, для решения задачи по определению источников акустических возмущений более целесообразно использовать модель [3], а для определения акустических характеристик в точке – другую модель [4]. Поэтому использование определенной акустической модели требует тщательного изучения уравнений, по которым определяются те или иные характеристики потока, а также факторы, которые влияют на них.

Источники авиационного шума имеют аэродинамическое происхождение, при этом акустические волны генерируются либо свободными турбулентными потоками (реактивная струя газов на выхлопе) либо при взаимодействии турбулентного потока с жесткими границами (шум лопаточных венцов газотурбинных двигателей, шум турбулентного слоя). Проблемой теоретического расчета звука занимались многие ученые, такие как Л. Я. Гутин, Е. Я. Юдин, Н. Н. Андреев, И. Г. Русаков, Д. И. Блохинцев [5–8]. Наиболее подходящей для решения сложных задач исследования звуковых характеристик лопаточных машин является работа [9], в которой М. Лайтхилл впервые использовал идею акустического уравнения для решения задач генерации шума свободным турбулентным потоком. Данную теорию развил Н. Керл, который распространил ее и для случая генерации звука потоком в присутствии твердых границ [10].

При исследовании шума вентилятора рассматривают три основных источника. Первый источник – монополюсный источник (сформирован движением лопатки), второй источник – дипольный (сформирован пульсацией давления в теле лопатки), третий источник – квадрупольный (сформирован турбулентным потоком) [11].

Спектр шума турбулентного механического происхождения обычно состоит из широкополосного шума и тонального. Со временем технологический процесс достиг значительных успехов в снижении тонального шума, из-за чего собственный шум лопатки (собственная частота) становится основным источником шумового загрязнения. Следующим логическим шагом является уменьшение шума, создаваемого следом лопатки (частотного шума лопатки, или собственной частоты). Исследовать данную проблему можно, используя имеющиеся программные средства.

Так, при использовании программной среды ANSYS Fluent предлагается выбор двух акустических моделей: broadband noise source model (BNSM) и FfowcsWilliams–Hawkings (FW-H) [2].

При расчете шума турбулентных струй в основном используют методы, которые основываются на модели Лайтхилла. Общее уравнение Лайтхилла включает в себя три члена, описывающие, соответственно, источники монопольного, дипольного и квадрупольного типов, и состоит из интегралов по объему потока и по поверхности, обтекаемой потоком (1):

$$q = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij} dV}{\gamma} + \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{\rho u_i u_n + p_i}{\gamma} dS + \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_S \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_n) \frac{dS}{r}, \quad (1)$$

где T_{ij} – тензор напряжений, представляющий собой разность между напряжениями в потоке и напряжениями в однородной покоящейся среде; p_i – величина аэродинамической нагрузки, действующей со стороны потока на поверхность S в направлении x_i ; u_n – нормальная к поверхности составляющая скорости потока вблизи поверхности.

В уравнении (1) (при помощи эквивалентных преобразований уравнений Навье–Стокса) акустическое поле турбулентной струи представлено в виде совокупности квадрупольей, которые находятся в правой части волнового уравнения. Амплитуда пульсаций эквивалентных квадрупольных источников в основном определяется нелинейной частью турбулентных пульсаций рейнольдсовских напряжений. Квадрупольные источники звука, порождаемые турбулентными пульсациями, переносятся полем струи, которое изменяет излучаемый звук вследствие доплеровского эффекта. Поле струи обладает и другим важным воздействием на излучаемый звук: оно приводит к рефракции звука при его прохождении через неоднородные структуры струи. Более полное описание рефракции звука возможно в рамках линеаризованной модели Эйлера с учетом нелинейных источников в правой части уравнений. Благодаря линейности левой части уравнений акустический сигнал дальнего поля может быть определен на основе теоремы о взаимности между прямой и сопряженной функциями Грина. В рамках решения сопряженной задачи источник и наблюдатель меняются местами, что приводит к экономии вычислительных ресурсов в условиях, когда требуется найти акустическое поле лишь в нескольких заданных положениях наблюдателя (микрофона), а не объемное распределение мощности звука в дальнем поле струи [12].

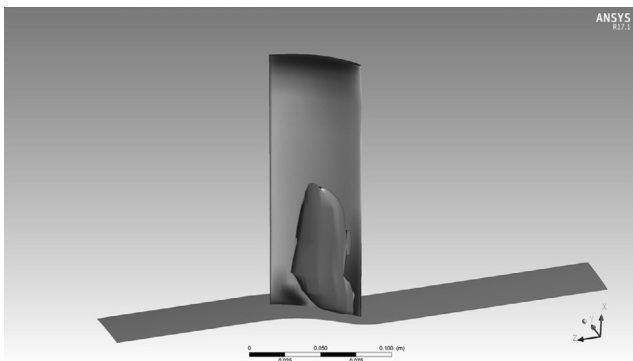


Рис. 1. Визуализация источника шума на лопатке

Описание акустических моделей. BNS модель используется для определения источников широкополосного шума, которые возникают в канале с лопатками (рис. 1).

Данный метод основан на работе Праундмена [13], который вывел из формулы Лайтхилла уравнение для определения акустической мощности (рис. 2), генерируемой изотопической турбулентностью без учета оснoвного течения:

$$P_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l}\right) \frac{u^5}{a_0^5}, \quad (2)$$

где u – турбулентная скорость; l – пространственная длина; a_0 – скорость звука; α – константа.

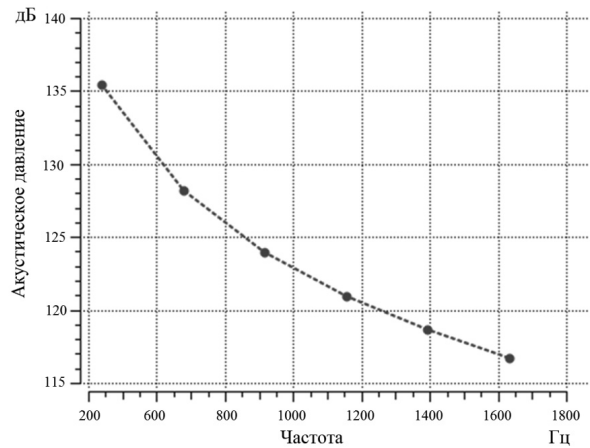


Рис. 2. Зависимость акустического давления от частоты при использовании модели BNS

Также при помощи этой модели можно рассчитать и акустическую силу (рис. 3.)

$$L_p = 100 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right), \quad (3)$$

где P_{ref} – эталонное акустическое давление.

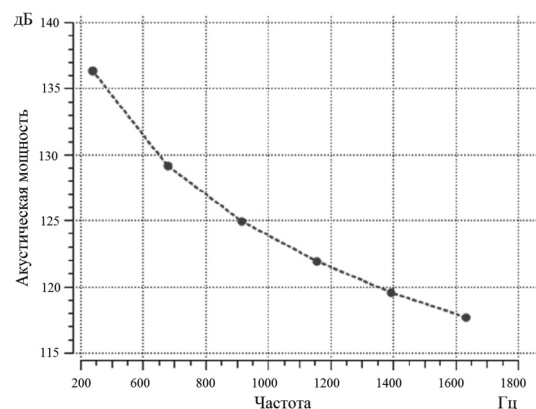


Рис. 3. Зависимость акустической мощности от частоты при использовании модели BNS

Во многих практических задачах, включающих турбулентные течения, шум не имеет каких-либо отдельных звуков, так как звуковая энергия непрерывно

распределяется по широкому диапазону частот. В этих случаях при использовании модели BNS статистическая величина турбулентности быстро вычисляется из RANS уравнений, которые могут быть использованы вместе с полуэмпирическими зависимостями и акустической моделью Лайтхилла для описания источника широкополосного шума. ANSYS Fluent предлагает несколько таких моделей источников, которые дают возможность определить количество локального воздействия (через единицу поверхности или объема) к общей акустической силе, создаваемой течением, а именно:

- формула Проудмана;
- модель источника шума реактивной струи;
- модель источника шума пограничного слоя;
- источниковые члены в линеаризованных уравнениях Эйлера;
- источниковые члены в уравнении Лайтхилла.

В конечном итоге, для определения мер по снижению уровня шума, создаваемого рассматриваемым течением, модели источников могут быть использованы для диагностирования источника шума и определения той части течения, которая отвечает за создание шума. Однако эти модели источников не прогнозируют величину звука в точках замера.

FW-H модель позволяет проводить акустические полевые вычисления во временном интервале на основе точных временных решений переменных поля обтекания. Иными словами, модель основывается на уже проведенном статическом расчете с предварительно известными источниками звука. Результаты могут быть выполнены в частотной области. Необходимые вычисления могут быть сделаны только в свободном пространстве и никаких внешних границ не должно быть, что ухудшает точность расчета, поскольку не учитываются отраженные от поверхностей волны. Вычисления основаны на прямых интегралах, определенных на поверхности. Процессом вычисления является метод граничных элементов. Поверхности, на которых проводится интегрирования, не должны быть физически выходными поверхностями, они могут быть любыми поверхностями, включающими входные дистрибутивы.

Модель Ffowcs-Williams and Hawkins (FW-H) представляет собой неоднородное волновое уравнение, которое получено из уравнения неразрывности и уравнения Навье–Стокса (2):

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{[P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f)\} + \frac{\partial}{\partial t} \{[\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f)\}, \quad (4)$$

где u_i – скорость потока по направлению x_i ; u_n – скорость потока в направлении нормали к плоскости $f = 0$; v_i – скорость поверхности по направлению x_i ; v_n – скорость поверхности по направлению нормали к плоскости $f = 0$; $\delta(f)$ – дельта-функция Дирака (это единичная импульсная обобщенная функция, которая позволяет записать точечное действие, а также пространственную

плотность физических величин (масса, заряд, интенсивность источника тепла, сила и т. д.), которые сосредоточены или приложены к одной точке); $H(f)$ – функция Хэвисайда (это единичная ступенчатая функция или функция единичного скачка. Она равна нулю при отрицательных значениях аргумента и единице при положительных. В нуле данная функция определена, поэтому ее обычно доопределяют в произвольное целое число).

Использование данного метода позволяет определять акустические характеристики в разных точках (рис. 4.) вне зависимости от проточной части и источника звука. Это очень важно, поскольку создание расчетной сетки на расстоянии установки микрофона требует огромных вычислительных мощностей. Данная модель использует больше ресурсов, чем модели BNS, но и точность результатов значительно выше.

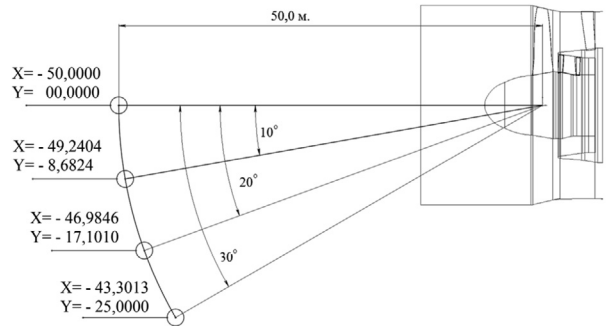


Рис. 4. Схема распределения микрофонов в экспериментальной модели

В работе рассматривалась модель вентилятора с установленными в нем лопатками ротора и статора. Рабочее колесо разделено на секторы таким образом, чтобы в каждом секторе было по одной лопатке (рис. 5). Первостепенной задачей для использования модели FW-H является решение стационарной модели с заданием частоты вращения и всех остальных входных данных. Входные данные были заданы в соответствии с экспериментальными результатами для возможности сравнения адекватности получаемых данных.

Для упрощения задачи на первом этапе задавалась акустическая модель BNS, по результатам расчетов которой определялись основные источники звука в канале с лопатками (рис. 6).

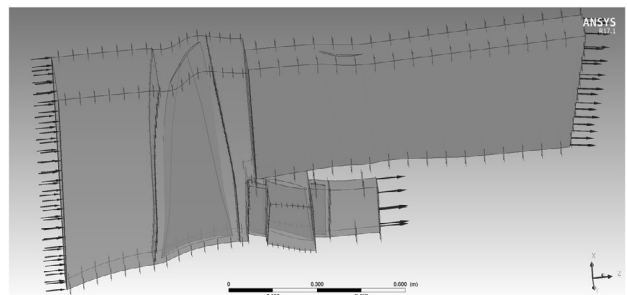


Рис. 5. Канал, разделенный на секторы по одной лопатке в каждом

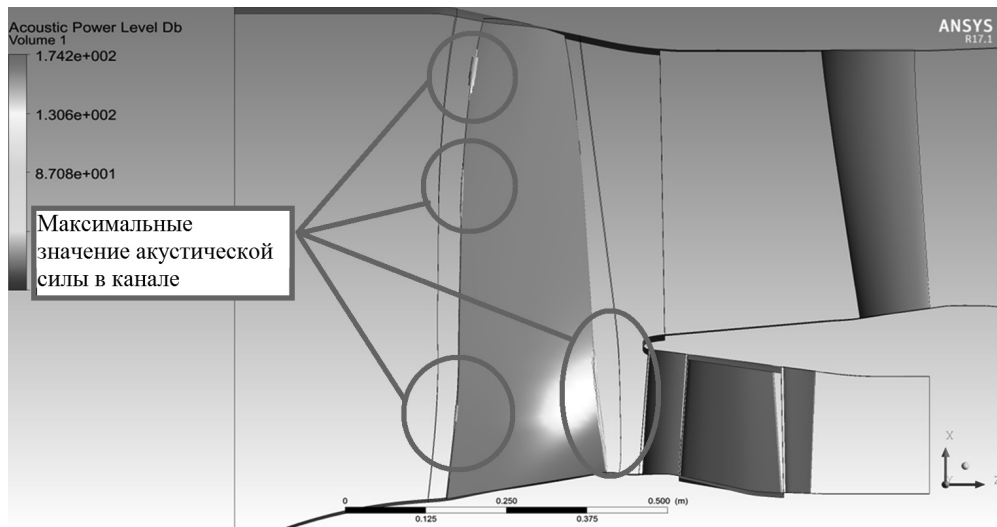


Рис. 6. Источники максимальных звуковых возмущений в канале с лопатками

В данном случае основными источниками звука в канале с рабочей лопаткой ротора являются кромки передней и задней части пера лопатки. Поэтому в последующей расчетной модели именно лопатка ротора будет определяться как основной источник шума.

Имея предварительные данные о источниках звуковых колебаний и получив адекватный результат стационарного расчета, задача переходит на второй этап нестационарного расчета. На этом этапе задаются основные источники звука, их характер и выбирается тип акустического уравнения (в данном случае FW-H). Для решения этой задачи также необходимо определить точки съема акустических характеристик.

Как видно из рис. 4, точки были выбраны таким образом, чтобы акустическая волна не перекрывалась твердыми телами и свободно проходила от источника к микрофону. Координаты точек соответствуют координатам установки микрофонов при проведении эксперимента, но поскольку решение ограничено особенностью

акустической модели, то использованы только первые четыре точки.

После проведения всех необходимых операций задача ставится на расчет. В итоге, после вычислений данные, снятые в точках установки, выводятся на экран и сравниваются с экспериментальными результатами (рис. 7, 8). Для облегчения анализа результатов графики акустических характеристик выведены вместе с графиком показаний акустического датчика.

Собственная частота ротора вентилятора определяется с учетом частоты вращения ротора n и количества лопаток z_B :

$$f = z_B \frac{n}{60} = 33 \cdot \frac{2202}{60} = 1211,1 \text{ Гц.} \quad (5)$$

Анализ зависимостей (рис. 7, 8) показывает, что данные результатов моделирования акустического давления значительно ниже экспериментальных. Различия в данных обусловлены учетом в модели только шума

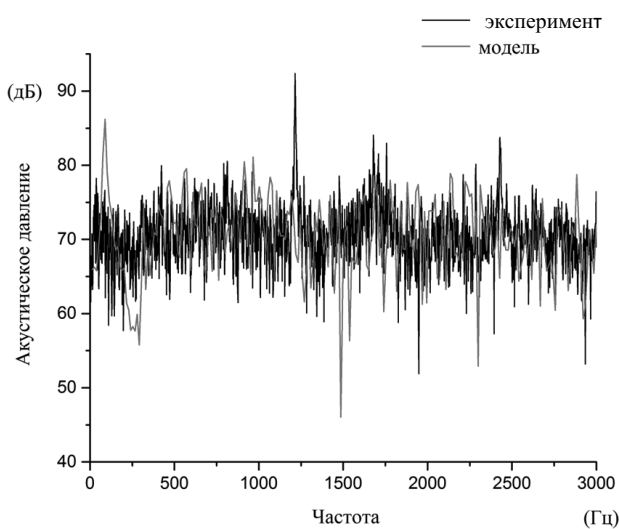


Рис. 7. Акустическое давление в точке съема при кромочном зазоре 0,5 мм

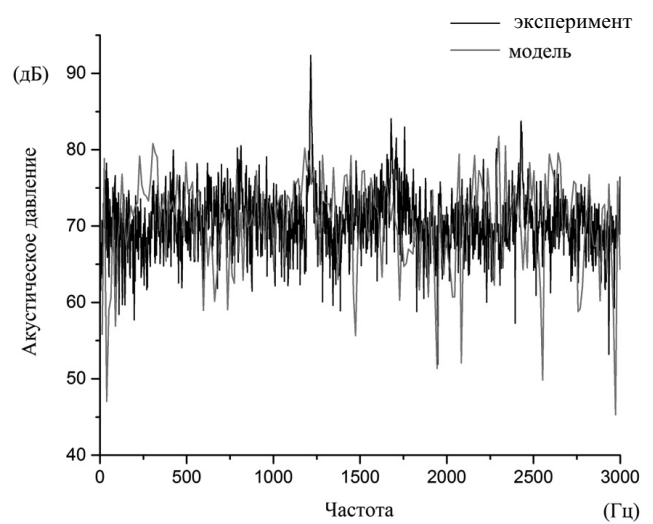


Рис. 8. Акустическое давление в точке съема при кромочном зазоре 1,0 мм

ротора вентилятора без остальных источников и размером сетки, поскольку величина ячейки является намного больше длины акустической волны.

Адекватность модели подтверждается схожестью в характере зависимостей в разных точках.

Недостатками метода с использованием модели BNS является отсутствие учета отражения от поверхностей, отсутствие звукового эффекта в потоке и низкая точность расчета. Расчет с использованием данной модели возможен только в стационарной постановке. Преимуществом данного метода является то, что с его помощью можно определить источники шума, сам метод не очень требователен к мощности ЭВМ.

К недостаткам модели Ffowcs-Williams and Hawkings можно отнести большие временные затраты и возможность расчета только прямых звуковых волн без отражений от поверхности. Данный метод может использоваться только при предварительном расчете, когда известны основные источники звука. Преимуществом данного метода является то, что его можно использовать при нестационарном расчете, получая характеристики пульсаций потока, а также он имеет большую точность получаемых данных, чем при использовании модели BNS.

СПИСОК ССЫЛОК

- Халецкий Ю. Д. Экологические проблемы авиации. М. : ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 504 с.
- Documentation for ANSYS ICEM CFD 14.0, © SAS IP, Inc., 2011.
- Horváth C., Vad J. Broadband noise source model acoustical investigation on unskewed and skewed axial flow fan rotor cascades // 14th International Conference on Fluid Flow Technologies. 2009. Pp. 682–689.
- Gennaro M., Caridi D., Pourkashanian M. Ffowcs Williams-Hawkings acoustic analogy for simulation of NASA SR2 propeller noise in transonic cruise condition // V European Conference on Computational Fluid Dynamics. Lisabon, Portugal, 14–17 June 2010.
- Гутин Л. Я. Избранные труды. Л. : Судостроение, 1977. 600 с.
- Борьба с шумом на производстве / Е. Я. Юдин, Л. А. Борисов, И. В. Горенштейн [и др.]. М. : Машиностроение, 1985. 400 с.
- Андреев Н. Н., Русаков И. Г. Акустика движущейся среды // Проблемы новейшей физики. 1934. Вып. XXII. 38 с.
- Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. М. ; Л. : Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1946. 220 с.
- Lighthill M. J. On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory // Proc. R. Soc. Lond. A 211. 1952. Pp. 564–587.
- Curle N. The influence of solid boundaries on aerodynamic sound // Proc. Roy. Soc. London. Vol. A231. No 1187. 1955. Pp. 505–514.
- Авиационная акустика : в 2-х ч. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов / А. Г. Мунин, В. Ф. Самохин, Р. А. Шипов [и др.] ; под ред. А. Г. Мунина. М. : Машиностроение, 1986. 248 с.
- Даулинг А. П., Карабасов С. А., Хайнс Т. П. Использование акустической аналогии и метода моделирования крупных вихрей для диагностики шума турбулентных струй // Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ). 2010. 41. № 1. С. 59–69.
- Proudman I. The Generation of Noise by Isotropic Turbulence. / I. Proudman // Proc. Roy. Soc. A 214:119. 1952. Pp. 119–125.

Рецензент Ю. М. Терещенко, д-р техн. наук, проф.
(Национальный авиационный университет)