

УДК 621.452.322

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНАЛЬНОГО ШУМА СТУПЕНИ ВЕНТИЛЯТОРА ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2014 К.Р. Пятунин<sup>1,2</sup>, Н.В. Архарова<sup>1</sup>, А.Е. Ремизов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

<sup>2</sup>Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьёва

С ужесточением норм ИКАО по шуму воздушных судов на местности необходимо большее внимание уделять акустическому проектированию силовых установок. Для современных гражданских авиационных двигателей с большой степенью двухконтурности характерно доминирующее влияние вентилятора на суммарный уровень шума. В связи с тем, что конструкция вентилятора и компрессора низкого давления в значительной степени определяет облик будущего двигателя, необходимо на этапе проектирования иметь возможность оценки акустических характеристик данного узла. Такую возможность предоставляет использование методов вычислительной аэроакустики. В данной статье представлены результаты численного моделирования тонального шума вентилятора с использованием коммерческого программного обеспечения. Расчёты выполнены на режиме захода на посадку. Результаты расчётов включают в себя диаграммы направленности акустического излучения на расстоянии 50 м от двигателя в передней полусфере. Моделирование выполнено в полной постановке для всех межлопаточных каналов рабочего колеса и спрямляющего аппарата ступени вентилятора при отсутствии осевой симметрии ступени. В статье дана оценка возможности использования представленного подхода для анализа акустических характеристик элементов авиационных двигателей. Также представлена трудоёмкость и затраты вычислительных ресурсов при выполнении моделирования.

*Аэроакустика, численное моделирование, ротор-статор взаимодействие, вентилятор, двухконтурный турбореактивный двигатель (ТРДД), преобразование Фурье, звуковое давление.*

Пристальное внимание общества к экологическим проблемам и острая конкурентная борьба на рынке авиаперевозок привели в настоящее время к новой шкале приоритетов при создании самолётов, в которой второе место после безопасности полётов прочно заняла проблема шума на местности. При этом определяющая роль в снижении шума воздушных судов принадлежит двигателям.

В настоящее время проектирование малошумных силовых установок для летательных аппаратов является комплексной задачей, решение которой требует не только оптимизации отдельных элементов двигателя, но и всего конструктивного облика в целом. Очень часто требования акустики вступают в противоречия с требованиями прочности, надёжности, технологичности и стоимости конструкции.

Для современных авиационных двигателей с высокой степенью двухконтурности характерно доминирующее влияние

вентилятора на суммарный уровень шума. В связи с этим достижение требуемых акустических характеристик вентиляторной ступени должно является одной из первоочередных целей на всех этапах проектирования гражданского авиационного двигателя. При этом для оценки эффективности конструктивных мероприятий требуется проведение большого количества экспериментальных работ на открытом испытательном стенде или в специализированных акустических камерах.

Однако процесс натурального эксперимента очень дорогостоящий, поэтому решать задачу о снижении шума необходимо ещё на этапе проектирования. Хотя сегодня трехмерные аэроакустические расчёты имеют достаточно высокую трудоёмкость и требуют наличия серьёзных вычислительных мощностей, прогресс в области вычислительной техники, совместно с последними достижениями в численных методах, позволяет решить задачу

о моделировании нестационарного ротор-статор взаимодействия и распространения акустических волн на достаточно высоком уровне.

Таким образом, основным путём решения проблемы проектирования малошумного двигателя является разработка комплексной акустической модели, включающей как основные источники шума, так и элементы системы шумоглушения.

В работе представлены результаты численного моделирования шума вентиляторной ступени перспективного гражданского авиационного двигателя в дальнем поле. Наиболее точным подходом к оценке шума от вентилятора с теоретической точки зрения является аэродинамическое моделирование области образования источников; выделение в ближнем поле контрольной поверхности (поверхности Кирхгоффа); определение на этой поверхности нестационарных параметров потока и расчёт распространения акустических пульсаций в дальнее поле с использованием аналитических подходов. В качестве области ближнего поля выбирается область вентиляторной ступени, канал воздухозаборника и некоторое пространство перед ним. В связи с тем, что конструкция ступени вентилятора не имеет осевой симметрии (рис. 1) и нет возможности смоделировать ступень вентилятора в виде секторов с кратным числом лопаток, аэродинамические расчёты выполнены в «полной» постановке с моделированием всех межлопаточных каналов рабочего колеса и спрямляющего аппарата вентилятора. В общем случае такой подход приводит к чрезмерно большой размерности сеточной модели. Поэтому целью данной работы является также и оценка возможности и трудоёмкости промышленного применения данной методики для анализа акустических характеристик вентилятора.

Гексагональная блочно-структурированная расчётная сетка построена с помощью автоматического сеткопостроителя Numesa AutoGrid. Размерность сетки составляет порядка 60 млн. узлов.

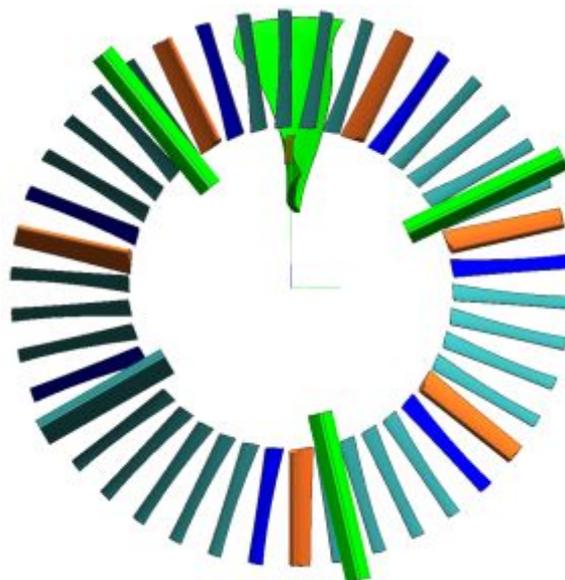


Рис. 1. Геометрическая модель вентиляторной ступени

Для получения установившегося периодического решения необходимо исключить отражение параметров потока от границ расчётной области. Для этого при построении сетки на входе и выходе расчётной области добавлены специальные участки с сильным разгущением расчётной сетки. На таких ячейках увеличивается вязкость конечно-разностной схемы, что приводит к затуханию волн давления, идущих к границам расчётной области. Общий вид сеточной модели представлен на рис. 2.

Первоначально был выполнен стационарный расчёт ступени вентилятора на режиме захода на посадку. Данные результаты были использованы в качестве исходных данных для выполнения нестационарного аэродинамического расчёта. Расчёты нестационарного ротор-статор взаимодействия выполнены в программном комплексе ANSYS CFX. В целом для оценки тональной составляющей шума достаточно RANS-подхода [1]. Однако результаты решения модельных задач, а также результаты расчётов шума вентилятора, представленные в статье [2], говорят о необходимости применения вихререшающих моделей турбулентности для аэродинамического моделирования. Размерность задачи не позволяет использовать метод моделирования крупных вих-

рей (LES), т.к. для этого потребуются огромные вычислительные ресурсы и значительно более подробные расчётные сет-

ки. Поэтому в расчётах использована SAS (Scale Adaptive Simulation) – модель турбулентности.

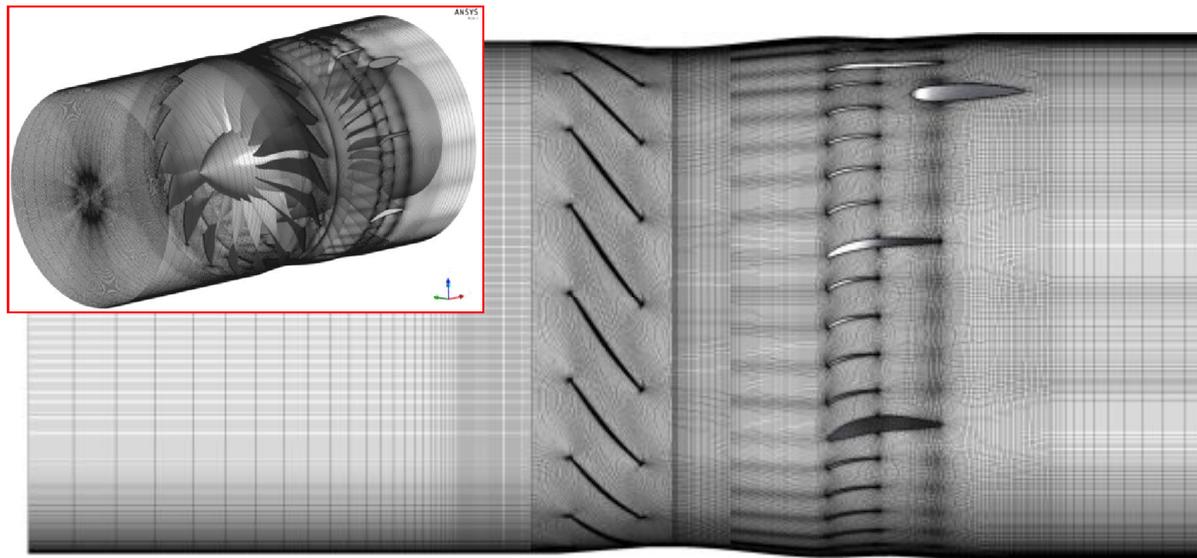


Рис. 2. Сеточная модель для расчёта акустических характеристик вентилятора

Вообще применение вихреразрывающих моделей (LES, DES, SAS) позволяет также выполнять расчёты с учётом широкополосной составляющей шума, однако для этого потребуется адаптация сеточной модели в области образования акустических источников. При этом следует отметить, что определяющее значение на общий уровень шума имеют несколько первых гармоник частоты следования лопаток (обычно первые четыре гармоники). Именно на эти частоты приходится максимум акустического излучения.

В расчётах использован постоянный шаг по времени, равный  $1.118 \times 10^{-5}$  с, что соответствует 2500 итерациям на один оборот рабочего колеса. Данный шаг по времени выбран из условия равенства числа Куранта единице. Для выхода на установившееся периодическое решение потребовалось два полных оборота. Запись нестационарных результатов также производилась в течение двух оборотов. Такие величины времени позволяют рассмотреть звуковые колебания в диапазоне частот от 17 до 45000 Гц.

На рис. 3 представлено мгновенное распределение энтропии в проточной части вентилятора, а также поле статического

давления перед рабочим колесом, полученные в результате нестационарного расчёта ротор-статор взаимодействия.

Полученное в результате расчётов нестационарное поле статического давления перед вентилятором преобразовано в распределённые акустические источники (диполи) с помощью преобразования Фурье (рис. 4).

Расчёты распространения звуковых волн в дальнее акустическое поле выполнены в программном комплексе LMS Sysnoise в постановке Exterior Direct BEM (направленный метод граничных элементов). Расчёты выполнены в частотной области для первых четырёх гармоник частоты следования лопаток рабочего колеса (643.8 Гц, 1287.6 Гц, 1931.4 Гц, 2575.2 Гц соответственно) без учёта среднего поля скоростей в канале воздухозаборника и непосредственно вокруг него. Выбор расчётного метода обусловлен имеющимся в распоряжении программным обеспечением. Метод граничных элементов позволяет использовать только поверхностные расчётные сетки, что даёт возможность расчёта трёхмерных акустических полей при любой конфигурации входного устройства при низкой вычислительной стоимости.

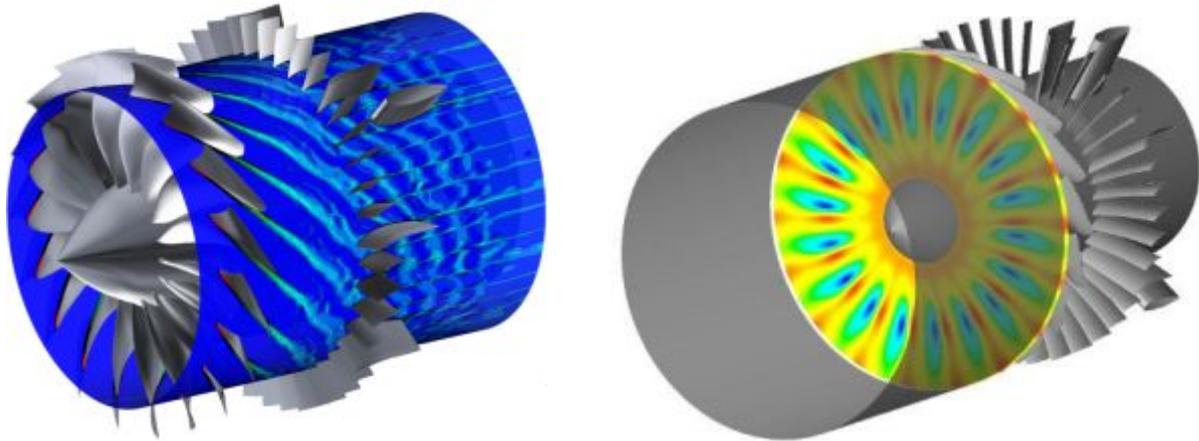


Рис. 3. Результаты расчёта ротор-статор взаимодействия

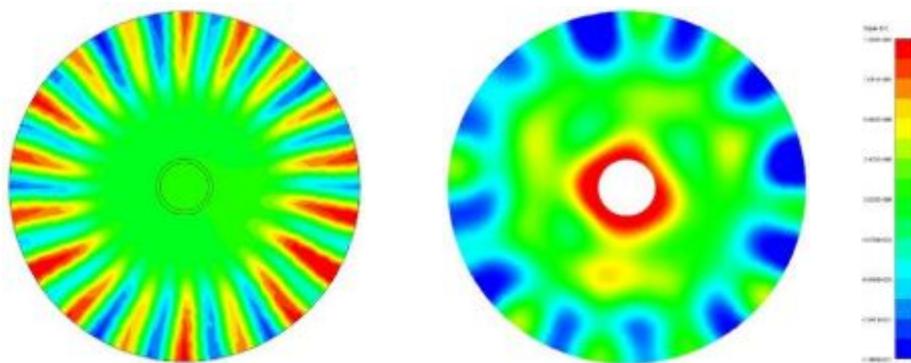


Рис. 4. Распределение эквивалентных источников звука (диполей) на входе в вентилятор для первых двух гармоник частоты следования лопаток рабочего колеса

В результате получены уровни звукового давления в точках на расстоянии 50 м от двигателя и построена диаграмма направленности акустического излучения.

На рис. 5 представлена суммарная диаграмма направленности акустического излучения, построенная по первым четырём гармоникам частоты следования лопаток рабочего колеса. Следует отметить,

что расчёты выполнены без учёта звукопоглощающих конструкций в канале воздухозаборника. Однако используемое программное обеспечение позволяет вводить в расчётную модель элементы системы шумоглушения, смоделированные в виде специальных импедансных граничных условий.

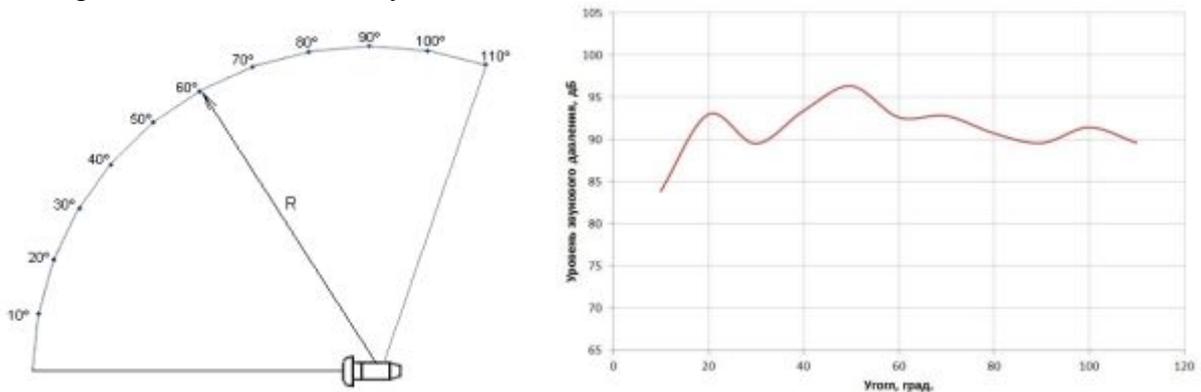


Рис. 5. Суммарная (по первым четырём гармоникам) диаграмма направленности акустического излучения

Наиболее затратным с точки зрения затрат вычислительных ресурсов является нестационарное аэродинамическое моделирование. Общее время расчётов (время на установление периодического решения и время на запись результатов) составляет около 2.5 недель процессорного времени с использованием 40 расчётных узлов (CPU – 2 x Intel Xeon (2 x 4 ядра)) с 8GB оперативной памяти на узле. При этом время на выполнение акустических расчётов составляет около 20 мин. на одной частоте.

Представленная методика может быть использована для разработки конст-

руктивных мероприятий по улучшению акустических характеристик вентиляторов и входных устройств ТРДД. Введение в расчётную модель специальных граничных условий на стенках входного и выходного каналов вентилятора позволит выполнять оценку эффективности элементов системы шумоглушения. Результаты расчётов, также могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки соответствия летательного аппарата международным нормам по шуму на местности на этапе проектирования.

### **Библиографический список**

1. Августиневич В.Г., Шмотин Ю.Н. и др. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. М.: Машиностроение, 2005. 536 с.
2. Reese H., Carolus T. Axial fan noise: towards sound prediction based on numerical unsteady flow data – a case study // 7th European Conference on Noise Control: Advanced Solutions for Noise Control, Euronoise: 2008., Paris.
3. Giles M.B. Calculation of of Unsteady Wake Rotor Interaction // AIAA Journal of Propulsion and Power. 1988. V. 4. P. 356-362.

4. Crocker M.J., Ivanov. N.I. Noise and vibration control in vehicles. St. Petersburg: Politekhnik Publ., 1993. 290 p.

5. Tournour M., El Hachemi Z., Read A., Barone F., Investigation of The Tonal Noise Radiated By Subsonic Fans Using The Aeroacoustic Analogy // Proceedings of Fan Noise Symposium, CETIM Senlis, 2003.

6. Maaloum A., Koudri S., Rey R., Aeroacoustic Performance Evaluation of Axial Flow Fans Based on the Unsteady Pressure Field on the Blade Surface // Applied Acoustics. 2004. V. 65, no. 4. P. 367-384.

### **Информация об авторах**

**Пятунин Кирилл Романович**, начальник бригады анализа аэродинамики, акустики и динамической прочности, конструкторский отдел систем инженерного анализа, Научно-производственное объединение «Сатурн». E-mail: [kodlin@bk.ru](mailto:kodlin@bk.ru). Область научных интересов: нестационарная аэродинамика, аэроакустика.

**Архарова Наталия Владимировна**, инженер-конструктор, конструкторский отдел систем инженерного анализа, Научно-производственное объединение «Са-

турн». E-mail: [arkharova\\_nata@mail.ru](mailto:arkharova_nata@mail.ru). Область научных интересов: аэроакустика, акустические измерения.

**Ремизов Александр Евгеньевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиационные двигатели», Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва. E-mail: [ad@rsatu.ru](mailto:ad@rsatu.ru). Область научных интересов: аэродинамика лопаточных машин.

## NUMERICAL SIMULATION OF TONAL NOISE OF A BYPASS ENGINE FAN STAGE

© 2014 K.R. Pyatunin<sup>1,2</sup>, N.V. Arharova<sup>1</sup>, A.E. Remizov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “NPO Saturn”, Rybinsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation

With the tightening of the norms of ICAO aircraft noise on the ground is necessary to pay more attention to the acoustic design of power plants. For modern civil aircraft engines with high bypass fan is characterized by a dominant influence on the overall noise level. Due to the fact that the design of the fan and LPC largely determines the design of the engine must still at the project stage to be able to assess the acoustic characteristics of this module. This provides an opportunity to use methods of computational aeroacoustics. The results of numerical simulation of fan tonal noise using commercial code were presented. The results of calculations include the sound pressure level and sound radiation directivity for approach. The simulation was carried out for full non-axisymmetric case. The possibility of using this method for evaluation of acoustic characteristics aircraft engines fan are analyzed.

*Aeroacoustics, numerical simulation, rotor-stator interaction, fan, bypass engine, Fourier transformation, sound pressure.*

### References

1. Avgustinovich V. G., Shmotin Yu.N. et al. Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh yavlenii v gazoturbinykh dvigatelyakh [Numerical simulation of unsteady effects in gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 536 p.
2. Reese H., Carolus T., Axial fan noise: towards sound prediction based on numerical unsteady flow data – a case study // 7<sup>th</sup> European Conference on Noise Control: Advanced Solutions for Noise Control, Euronoise: 2008., Paris.
3. Giles M. B. Calculation of Unsteady Wake Rotor Interaction // AIAA Journal of Propulsion and Power. 1988. V. 4. P. 356-362.
4. Crocker M. J., Ivanov. N. I. Noise and vibration control in vehicles. St. Petersburg: Politekhnik Publ., 1993. 290 p.
5. Tournour M., El Hachemi Z., Read A., Barone F., Investigation of The Tonal Noise Radiated By Subsonic Fans Using The Aeroacoustic Analogy // Proceedings of Fan Noise Symposium, CETIM Senlis, 2003.
6. Maaloum A., Koudri S., Rey R., Aeroacoustic Performance Evaluation of Axial Flow Fans Based on the Unsteady Pressure Field on the Blade Surface // Applied Acoustics. 2004. V. 65, no. 4. P. 367-384.

### About the authors

**Pyatunin Kirill Romanovich**, head of the team of Aerodynamics, Aeroacoustics and Dynamic Strength, Engineering Analysis Department, JSC «NPO «Saturn» (Rybinsk). E-mail: [kodlin@bk.ru](mailto:kodlin@bk.ru). Area of Research: unsteady aerodynamics, aeroacoustics.

**Arharova Natalia Vladimirovna**, JSC «NPO «Saturn» (Rybinsk), design engineer, Team of Aerodynamics, Aeroacoustics and Dynamic Strength, Engineering Analysis

Department, E-mail: [arkharova\\_nata@mail.ru](mailto:arkharova_nata@mail.ru). Area of Research: aeroacoustics, acoustic measurements.

**Remizov Alexander Evgenievich**, Doctor of Science (Engineering), head of the aircraft engines department, Rybinsk State Aviation Technical University E-mail: [ad@rsatu.ru](mailto:ad@rsatu.ru). Area of Research: aerodynamics of turbomachines.