

## ВЛИЯНИЕ ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЁТА УРОВНЯ ШУМА ВЕНТИЛЯТОРА ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2018

**К. Р. Пятунин** начальник конструкторского отдела систем инженерного анализа;  
ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск;  
[kirill.pyatunin@uec-saturn.ru](mailto:kirill.pyatunin@uec-saturn.ru)

**Н. В. Архарова** инженер-конструктор бригады аэродинамики, акустики и динамической  
прочности, конструкторский отдел систем инженерного анализа;  
ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск;  
[arkharova\\_nata@mail.ru](mailto:arkharova_nata@mail.ru)

Для современных авиационных двигателей с высокой степенью двухконтурности характерно доминирующее влияние вентилятора на общий уровень шума. В статье представлены результаты исследования влияния подхода к моделированию турбулентности при моделировании генерации шума ступенью двухконтурного вентилятора на результаты прогнозирования уровня шума. Численные исследования выполнены для модельной ступени вентилятора в условиях проведения испытаний в заглушенной камере на основных рабочих режимах, определяющих его акустические свойства. Расчёты уровня шума в дальнем поле выполнены с помощью метода конечных элементов на основе модального состава генерируемого шума. Проанализировано влияние модели турбулентности на количество и амплитуды акустических мод, возбуждающихся в потоке на основных гармониках частоты следования лопаток вентилятора. Показано, что моделирование анизотропной турбулентности потока при расчёте нестационарного ротор-статор взаимодействия позволяет получить близкие к экспериментальным уровни шума.

*Двухконтурный турбореактивный двигатель; вентилятор; ротор-статор взаимодействие; звуковое давление; аэроакустика; турбулентность; канальные моды; численное моделирование.*

---

**Цитирование:** Пятунин К.Р., Архарова Н.В. Влияние подхода к моделированию турбулентности на точность расчёта уровня шума вентилятора двухконтурного турбореактивного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 102-114. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-102-114

### Введение

Одним из приоритетных направлений стратегии развития Объединённой двигательной корпорации является увеличение доли гражданской продукции в общем портфеле заказов и выход на международные рынки. Однако в условиях высокой конкуренции на рынке гражданских авиаперевозок необходимо уделять внимание не только технологическому совершенству силовых установок, но и их экологическим характеристикам. Вступление в силу в 2017 г. главы 14 стандарта ICAO по шуму пассажирских самолётов на местности означает новый виток по принуждению производителей к активной работе по снижению шума и поэтому производители авиадвигателей и самолётов должны действовать в данном направлении совместно.

Разработка современных авиационных двигателей – это комплексный процесс, который характеризуется высокой мультидисциплинарностью. Учёт всех противоречивых требований по высоким удельным параметрам, уровню безопасности, экологичности, эргономичности и экономической эффективности в условиях сжатых сроков вывода продукции на рынок возможен только при опережающей отработке всех технических решений средствами вычислительного эксперимента.

Для того чтобы на самых ранних стадиях проектирования спрогнозировать уровень шума авиационного двигателя, необходимо иметь виртуальную модель, отражающую изменение акустических характеристик основных его узлов при изменении облика. Такая модель, с одной стороны, должна обладать достаточной точностью для адекватного отражения малых конструктивных изменений и получения близких к реальным уровней шума, а с другой стороны – должна обладать достаточной «робастностью» и скоростью получения результатов.

В работе представлены результаты по настройке промышленной методики расчёта шума вентиляторной ступени авиационного двигателя с высокой степенью двухконтурности.

Представлена оценка влияния используемых подходов к моделированию турбулентности (RANS, DES, SAS SST) на модальный состав и общий уровень шума. Точность разработанной методики оценивается путём сопоставления расчётного уровня звукового давления с экспериментальными значениями, полученными в работах [1; 2] по отдельным гармоникам.

Объект, на примере которого исследуется влияние модели турбулентности – модельный двухконтурный вентилятор с высокой степенью двухконтурности. Спрямяющий аппарат второго контура является частью силовой схемы компрессора низкого давления (КНД) и имеет равномерно распределённые по окружности силовые спрямляющие лопатки. Специально подобранное количество лопаток рабочего колеса и спрямляющего аппарата, а также отсутствие стоек промежуточного корпуса позволяет практически полностью исключить тональный шум на первой гармонике частоты следования лопаток вентилятора за счёт реализации явления «отсечки». Данную схему КНД имеют сегодня такие двигатели как GE90, GENx, Trent1000, GP7200, LeapX. Однако, в отличие от реального двигателя, модельный вентилятор (рис. 1) имеет два ряда технологических стоек, которые обеспечивают силовую связь технологических корпусов. Наличие данных стоек может приводить к возникновению тонального шума на частоте следования лопаток рабочего колеса, поэтому их необходимо учитывать при моделировании.

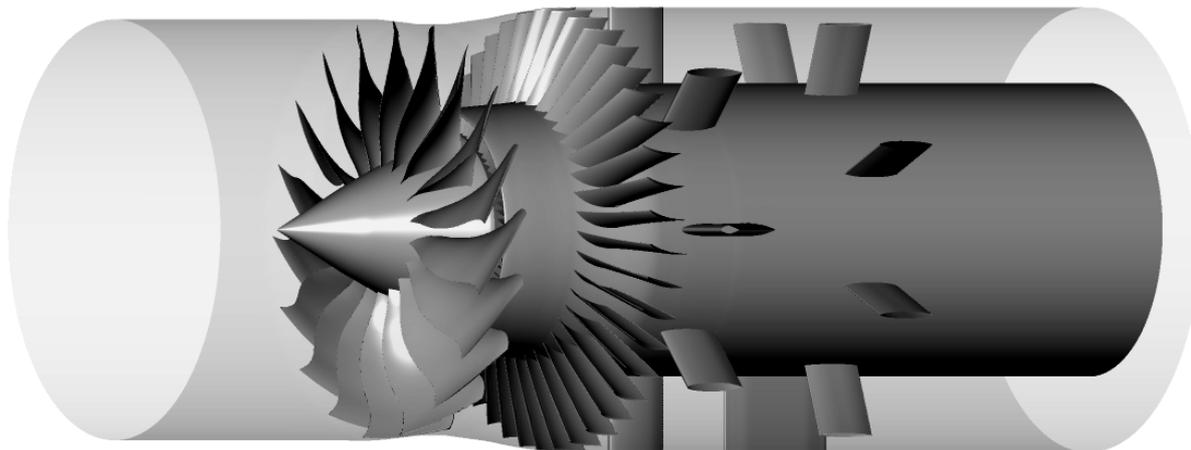


Рис. 1. Геометрическая модель вентиляторной ступени

Для того, чтобы смоделировать образование шума в ступени вентилятора, необходимо с помощью CFD методов смоделировать все внутренние источники. Имея о них информацию (давления, скорости и их пульсации), можно спрогнозировать уровень звукового давления, который будет иметь место в точке наблюдения в дальнем поле.

При разработке аэродинамического проекта КНД, когда по результатам расчётов становятся известны все геометрические и аэродинамические параметры на основных режимах, возможно использование полуэмпирической теории для расчёта шума вентилятора [3]. Несмотря на то, что данная теория может дать достаточно точное представление об уровне шума вентилятора, работает она только для достаточно простых конструкций и абсолютно не учитывает трёхмерных эффектов и геометрических особенностей конструкции (пространственную геометрию лопаток и сложную структуру потока). Более точную информацию о шуме вентилятора позволяет получить расчёт акустических источников на основе нестационарного аэродинамического моделирования. При этом необходимо моделировать не только ротор-статор взаимодействие, но и флуктуации потока, возникающие при нестационарном обтекании элементов конструкции.

Наиболее точным решением данной задачи является прямое численное моделирование (DNS – Direct Numerical Simulation). Однако использование данного подхода в рамках промышленного применения при моделировании лопаточных машин потребовало бы огромных вычислительных ресурсов, что делает решение этой задачи практически невозможным. На сегодняшний день не позволяет решить данную задачу и модель крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation).

Решением данной задачи может стать использование гибридных моделей, которые сочетают в себе возможности RANS и LES подходов. Рассмотрим несколько основных моделей, которые реализованы в коммерческих CFD кодах.

Метод моделирования отсоединённых вихрей – Detached Eddy Simulation (DES). Идея модели DES состоит в том, что одна «базовая» RANS модель работает в режиме RANS только в областях потока, где сетка недостаточна для разрешения турбулентных структур, или в режиме LES в остальной части потока. Для пристенных отрывных течений это означает, что LES работает только в отрывных областях, населённых относительно крупными («отсоединёнными») вихрями, для разрешения которых вычислительные затраты LES приемлемы. RANS работает только в присоединённых областях, населённых мелкими вихрями, для разрешения которых в рамках LES нужны очень мелкие сетки, а RANS является достаточно надёжным и «дешёвым» подходом.

Метод адаптивных масштабов – Scale Adaptive Simulation (SAS). В отличие от модели DES разделение на RANS и LES происходит по решению: по наличию или отсутствию вихревых структур. В данной модели линейный масштаб определяется не шагом сетки, а решением с помощью подсеточной модели.

Для акустических пульсаций в каналах турбомашин возможно применить теорию о распространении звуковых волн в кольцевом или цилиндрическом канале. Звуковые волны в таких каналах распространяются в виде простейших форм колебаний (мод) или их суперпозиции на некоторых резонансных частотах. Для этого вместо прямого численного расчёта в канале вентилятора необходимо использовать преобразование Фурье к волновому уравнению, записанному в цилиндрических координатах.

Как известно, при ротор-статор взаимодействии на частоте следования лопаток рабочего колеса и её гармониках возбуждаются только моды, окружное число которых вычисляется по формуле:

$$m = nB + kV,$$

где  $B$  – количество лопаток рабочего колеса;  $V$  – количество лопаток спрямляющего аппарата;  $n$  – номер гармоники частоты следования лопаток;  $k$  – целое число (...–1, 0, 1, 2...).

На каждой гармонике частоты следования лопаток образуется бесконечное число мод. При этом, если получить затухание моды с наименьшим возможным (по модулю)

окружным числом, то можно получить экспоненциальное затухание остальных мод на этой гармонике. Чтобы получить затухание мод на первой гармонике, необходимо выбирать соотношение числа лопаток рабочего колеса и спрямляющего аппарата согласно неравенству

$$V \geq 2nB.$$

Затухание мод на второй гармонике возможно в случае, когда окружное число  $m$  является отрицательным. В данном случае мода вращается в сторону, противоположную вращению рабочего колеса, и вентилятор препятствует распространению волн. На каждой гармонике затухать будут только те моды, для которых выполняется условие:

$$nB \leq |m|.$$

Теоретически модальный состав шума, полученный на основе RANS метода, должен иметь другой набор акустических мод, полученных на основе RANS/LES методов за счёт мод, образованных турбулентными пульсациями потока.

### Результаты расчётов и их обсуждение

Для проверки данного предположения была выполнена серия расчётов модельного вентилятора на моделях k- $\epsilon$ , DES и SAS SST и проведены расчёты шума методом канальных мод. На рис. 2 представлена используемая в расчётах сеточная модель. Она имеет блочно-структурированную топологию и содержит все межлопаточные каналы рабочего колеса, входного направляющего аппарата бустера, спрямляющего аппарата внешнего контура и каскадов технологических стоек. Максимальную густоту имеет область образования акустических источников, на входном и выходном участке предусмотрены буферные зоны для подавления акустических возмущений и минимизации отражения волн от входной и выходной границ модели.

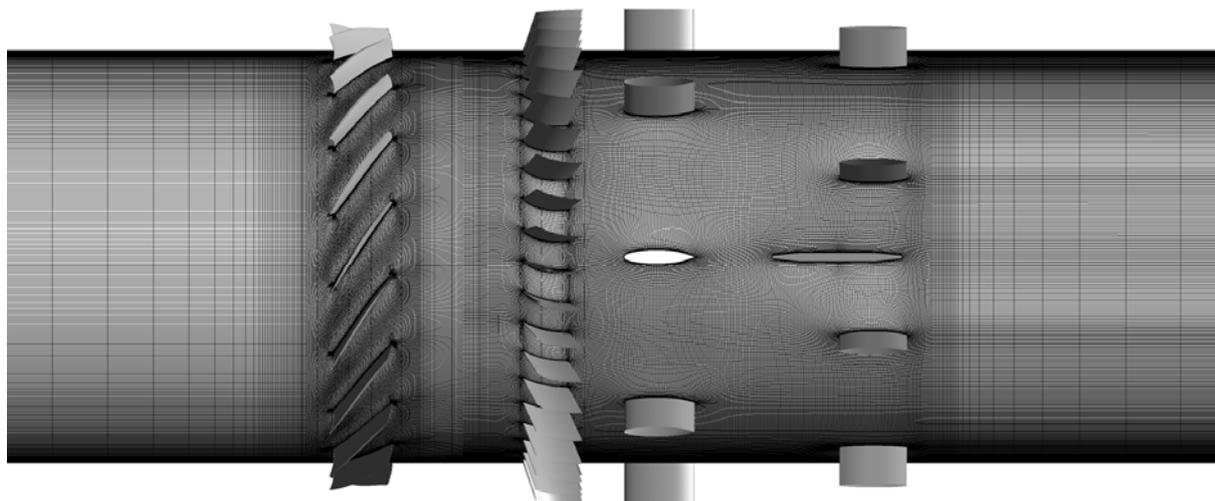


Рис. 2. Сеточная модель для расчёта акустических характеристик вентилятора

Первоначально на представленной сеточной модели были выполнены стационарные аэродинамические расчёты на режимах взлёта, набора высоты и посадки и определены граничные условия на линии рабочих режимов.

Полученные расчётные характеристики внешнего контура ступени вентилятора представлены на рис. 3.

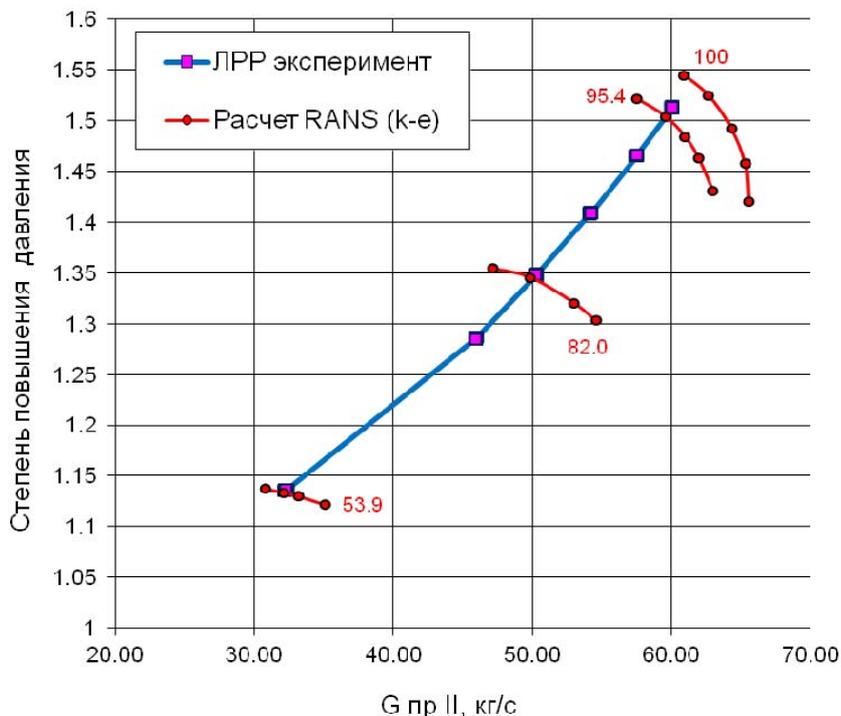


Рис. 3. Напорные характеристики модельного вентилятора

Далее в точках на линии рабочих режимов выполнялись нестационарные аэродинамические расчёты.

В процессе нестационарного моделирования необходимо обеспечить установления квазистационарного режима течения в проточной части вентилятора. Для этого были выполнены предварительные расчёты трёх полных оборотов рабочего колеса, после чего выполнялась запись нестационарных данных за период одного полного оборота.

Распределение чисел Маха в проточной части (рис. 4) показывает значительные флуктуации потока, при этом основные различия между моделями k-ε, DES и SAS SST видны на режимах посадки и набора высоты. На данных режимах хорошо просматривается процесс образования и схода вихрей с профиля рабочей лопатки. Данные вихри и их распад в следах за лопатками и являются основным источником широкополосного шума.

По структуре закомочных следов видно, что наименьшую интенсивность имеют следы, полученные в результате расчёта на модели k-ε, а наибольшую – на модели SAS SST. Таким образом, модель SAS SST должна показывать более высокий уровень тонального шума. На режиме взлёта отчётливо видны ударные волны, которые и являются основным источником шума.

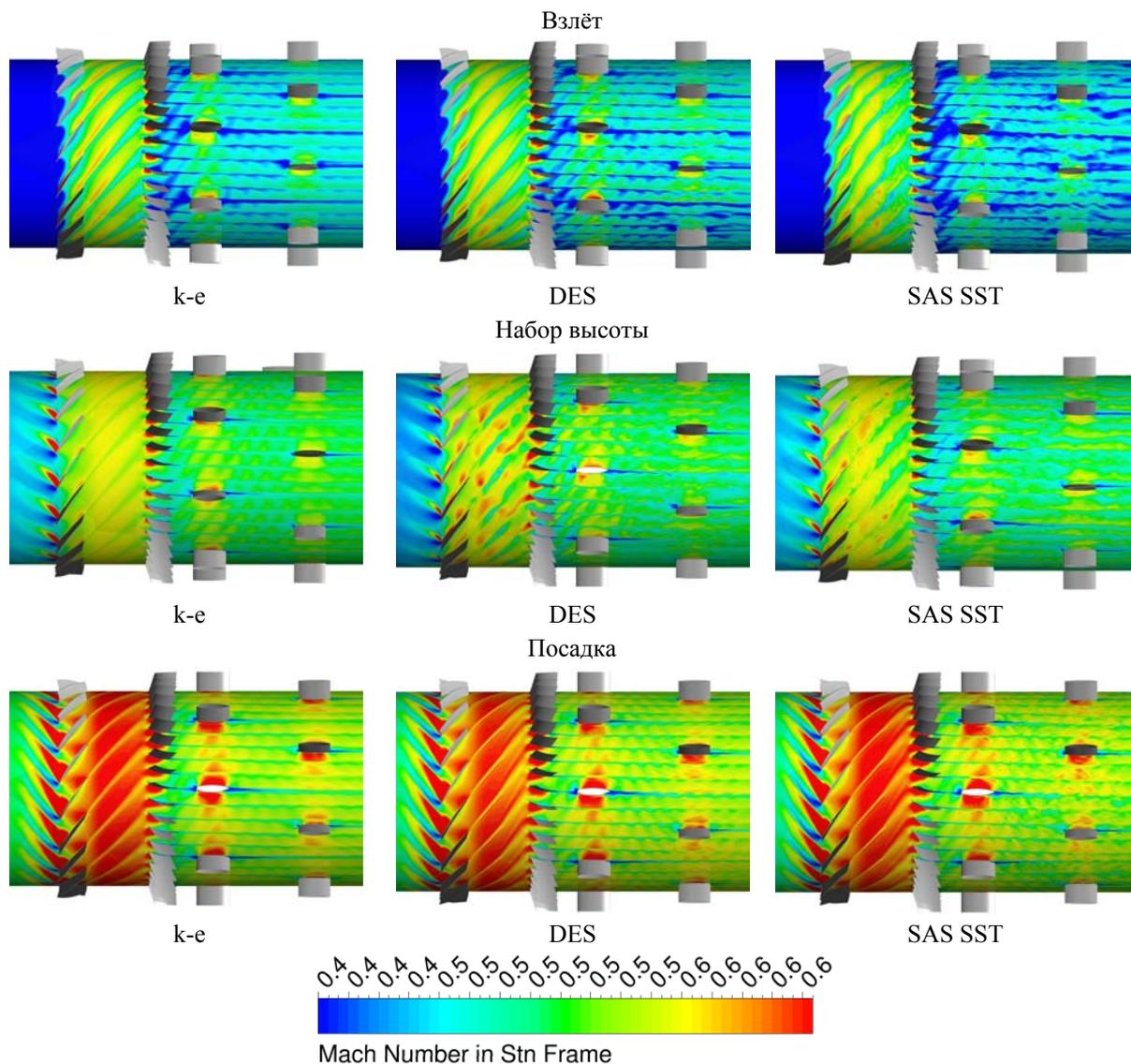


Рис. 4. Распределение абсолютных чисел Маха в проточной части

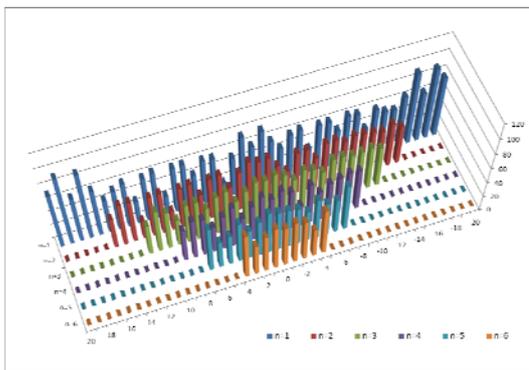
По результатам нестационарных расчётов была выполнена модальная декомпозиция полей нестационарного давления и определены основные формы акустических колебаний во входном и выходном каналах вентилятора. На рис. 5–7 представлены номера и амплитуды распространяющихся мод на первой гармонике частоты следования лопаток рабочего колеса (BPF – blade passing frequency). Остальные моды являются затухающими.

Как видно, при использовании различных моделей для моделирования турбулентности расчётный набор распространяющихся мод идентичен, однако появляется существенная разница в их амплитудах. Особенно это заметно при сравнении акустических мод во входном канале вентилятора. Различия по амплитуде наиболее интенсивных мод достигают 20% – на режиме взлёта, 30% – на режиме набора высоты и 50% – на режиме посадки.

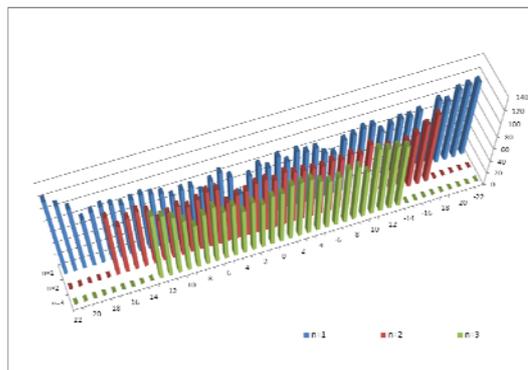
Взлёт

1 BPF

k-e

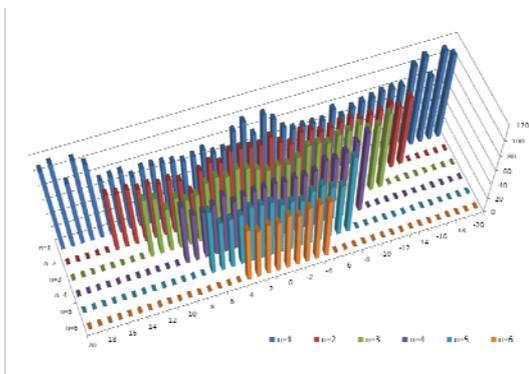


ВХОД

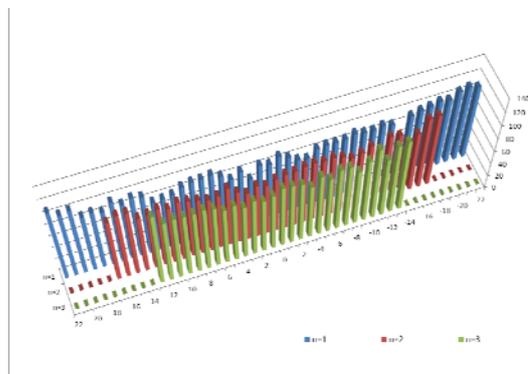


ВЫХОД

DES

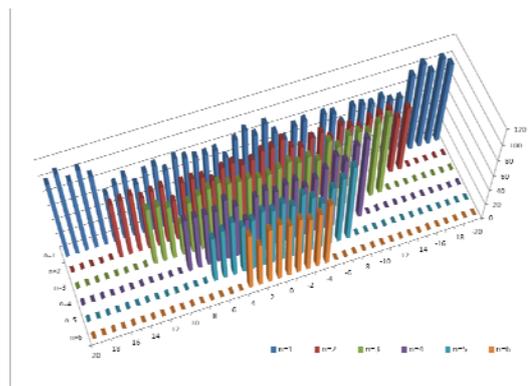


ВХОД

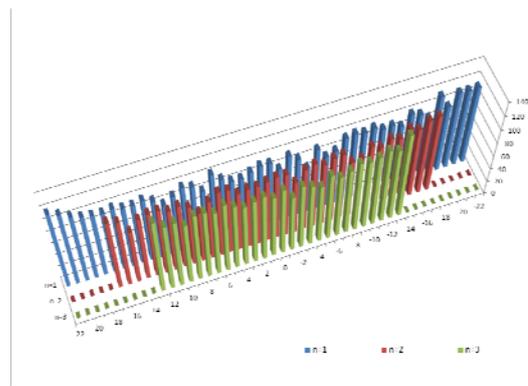


ВЫХОД

SAS  
SST



ВХОД



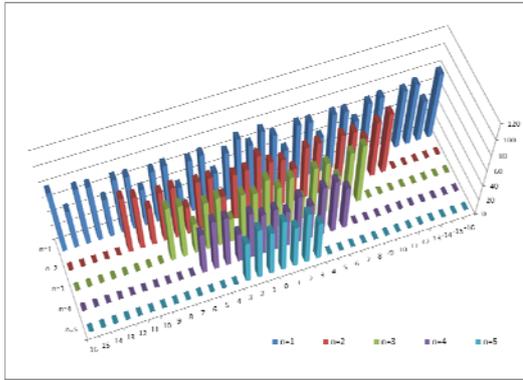
ВЫХОД

Рис. 5. Амплитуды акустических мод на режиме взлёта для первой гармоники частоты следования рабочих лопаток

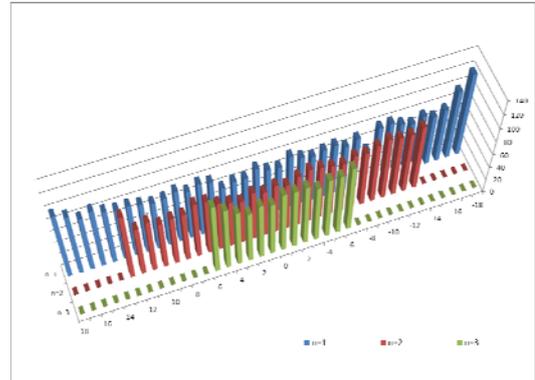
Набор высоты

1 ВРФ

k-e

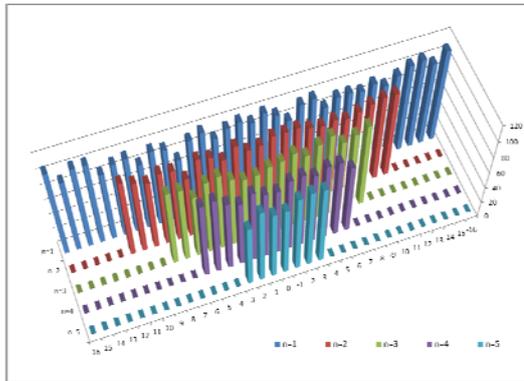


ВХОД

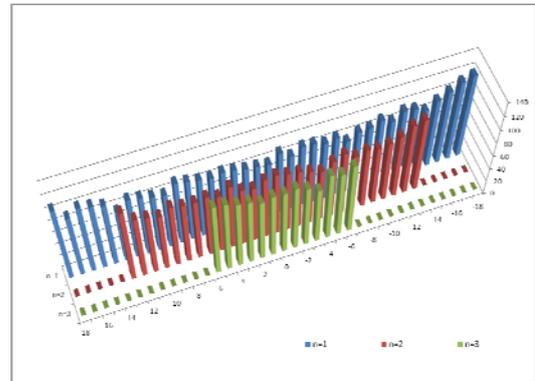


ВЫХОД

DES

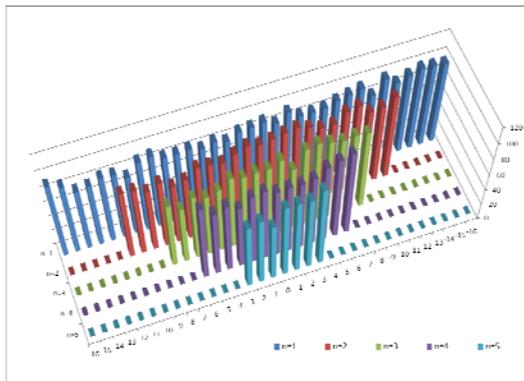


ВХОД

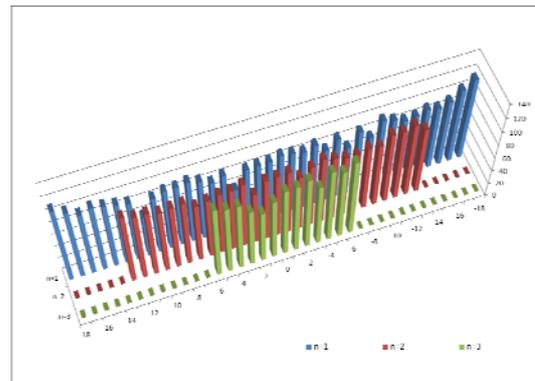


ВЫХОД

SAS  
SST



ВХОД



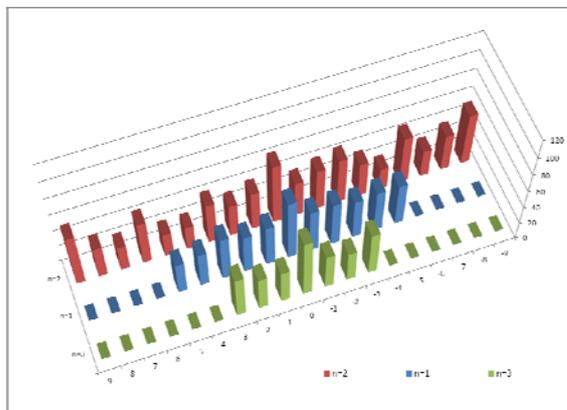
ВЫХОД

Рис. 6. Амплитуды акустических мод на режиме набора высоты для первой гармоники частоты следования рабочих лопаток

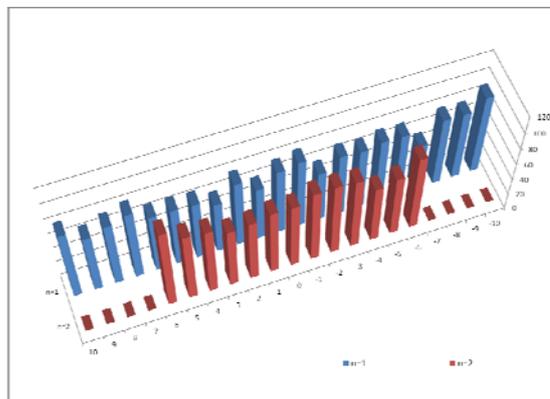
Посадка

1 BPF

k-e

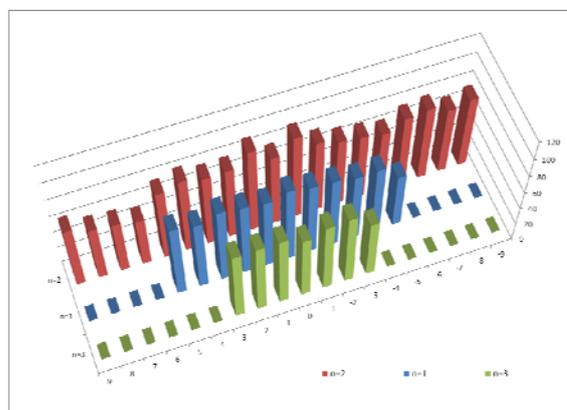


ВХОД

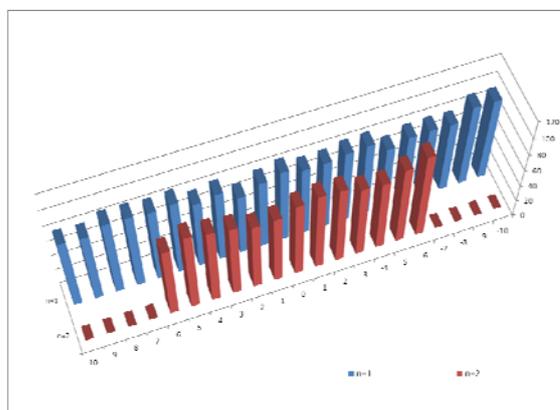


ВЫХОД

DES

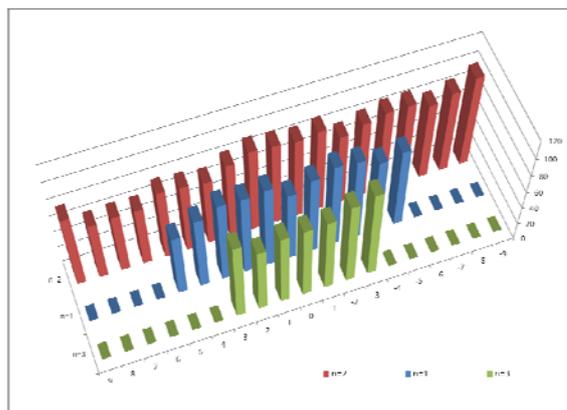


ВХОД

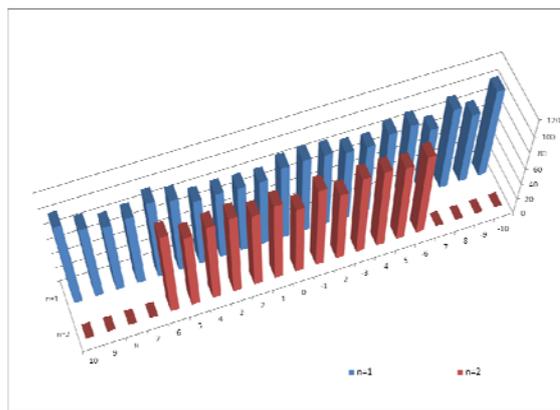


ВЫХОД

SAS  
SST



ВХОД



ВЫХОД

Рис. 7. Амплитуды акустических мод на режиме посадки для первой гармоники частоты следования рабочих лопаток

В целом при использовании анизотропных моделей турбулентности (DES, SAS SST) наблюдается более наполненный модальный состав за счёт того, что моды, образованные турбулентными пульсациями, дополнительно усиливают моды ротор-статор взаимодействия, имеющие те же окружные числа.

Диаграммы направленности акустического излучения в дальнем поле (рис. 8–13) подтверждают предположение о значительном влиянии широкополосной составляющей при моделировании шума ступени вентилятора.

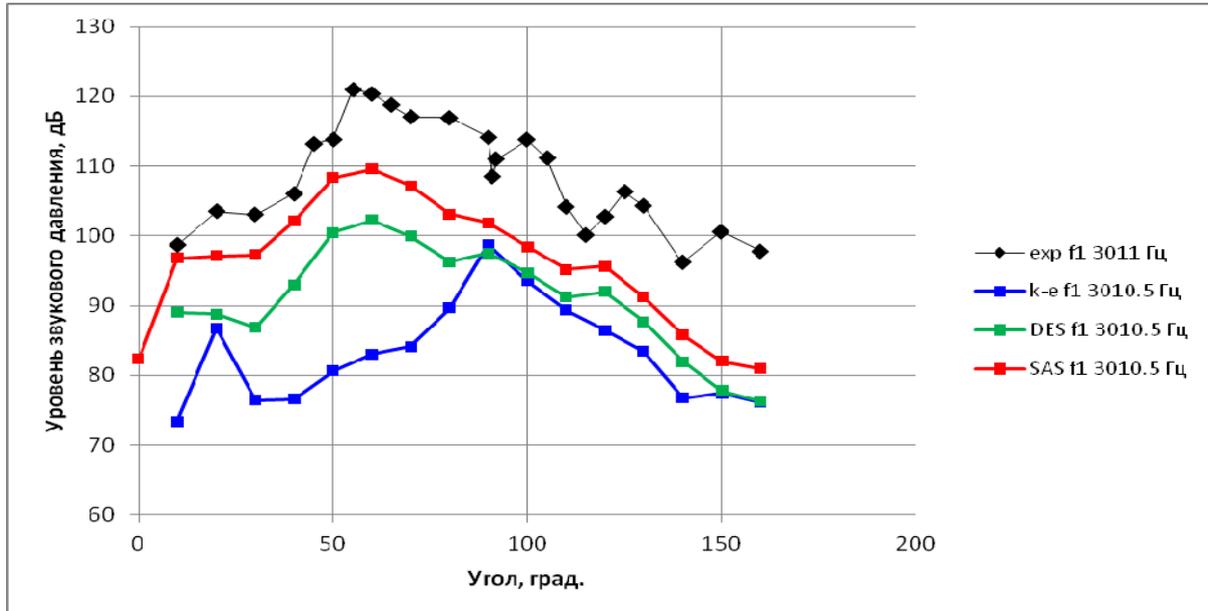


Рис. 8. Диаграмма направленности акустического излучения на первой гармонике для режима взлёта

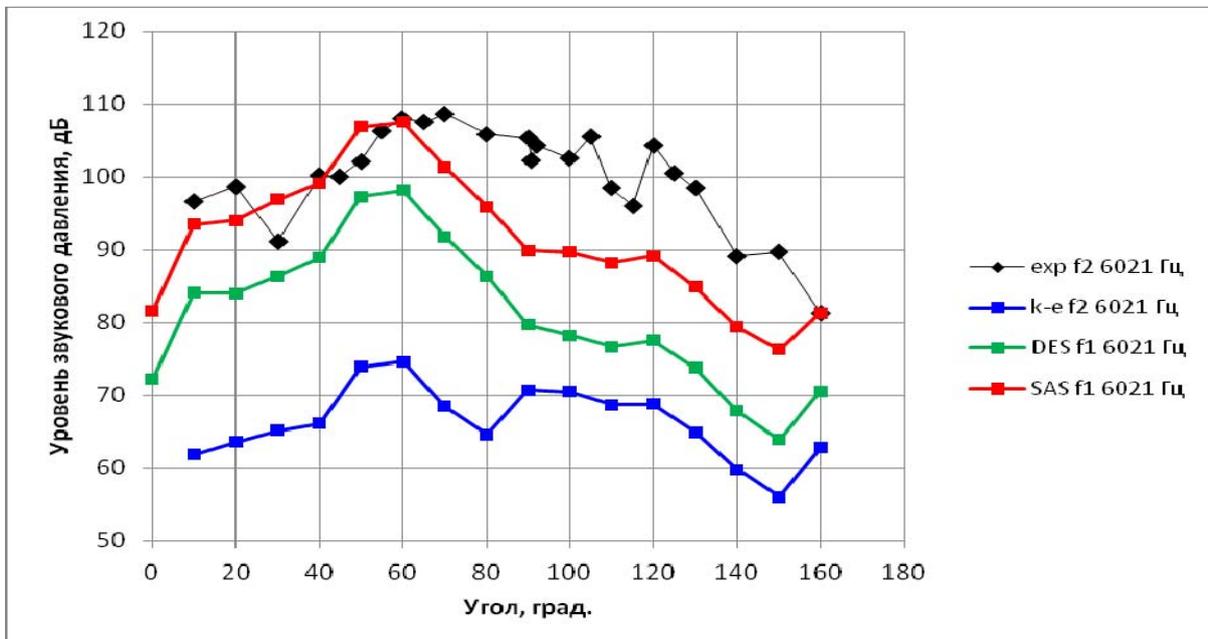


Рис. 9. Диаграмма направленности акустического излучения на второй гармонике для режима взлёта

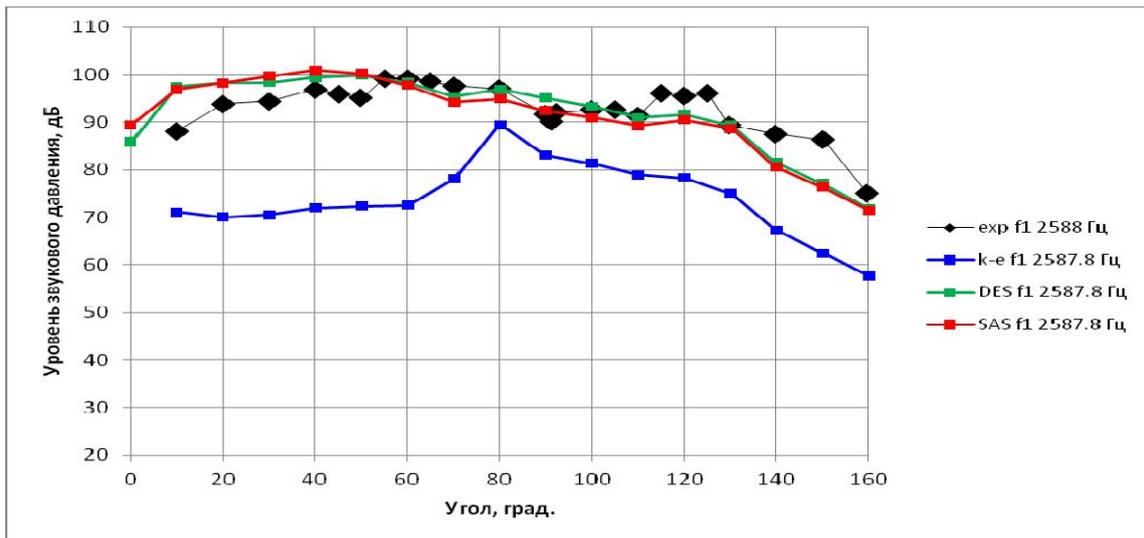


Рис. 10. Диаграмма направленности акустического излучения на первой гармонике для режима набора высоты

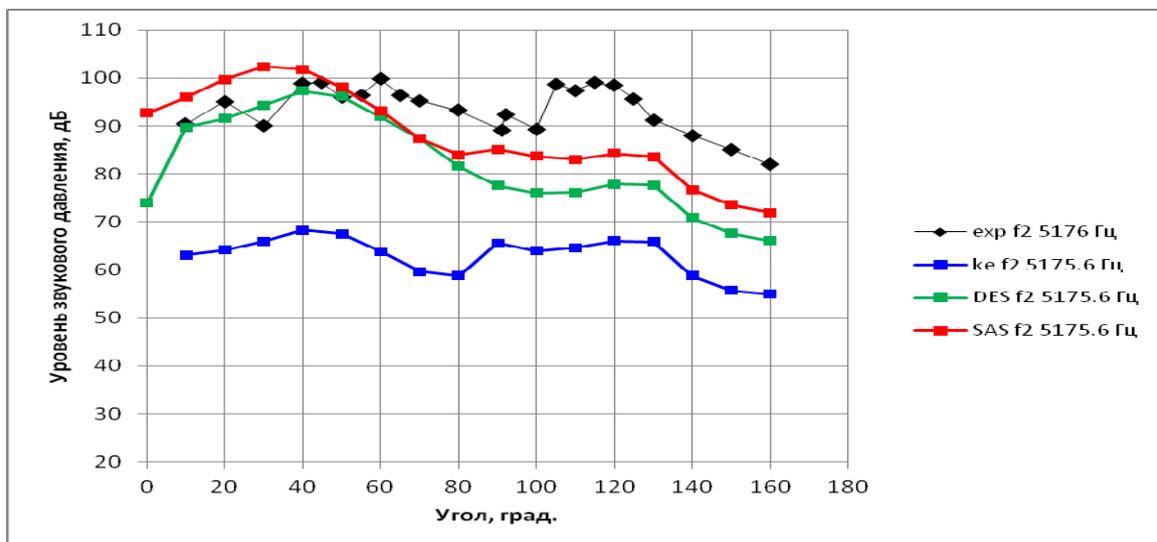


Рис. 11. Диаграмма направленности акустического излучения на второй гармонике для режима набора высоты

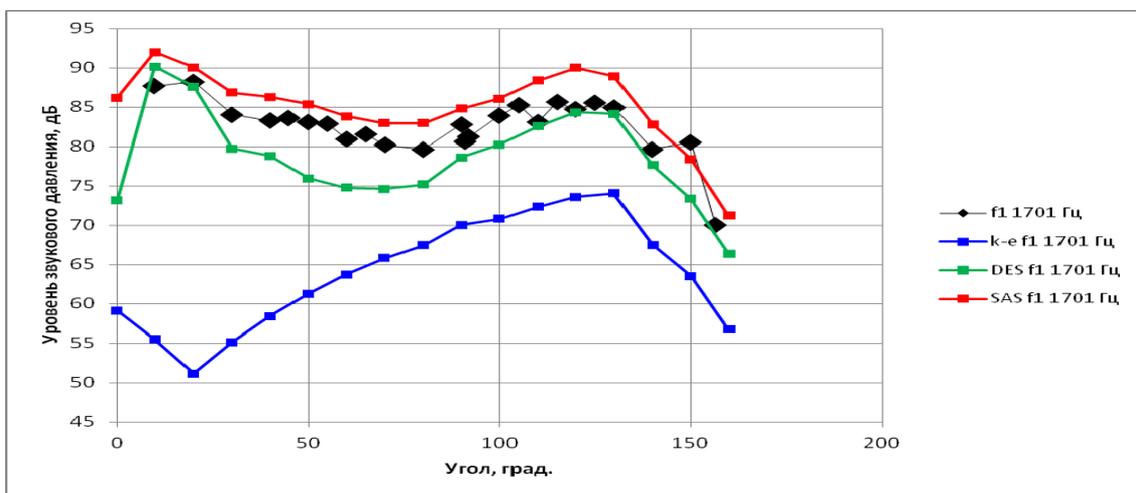


Рис. 12. Диаграмма направленности акустического излучения на первой гармонике для режима посадки

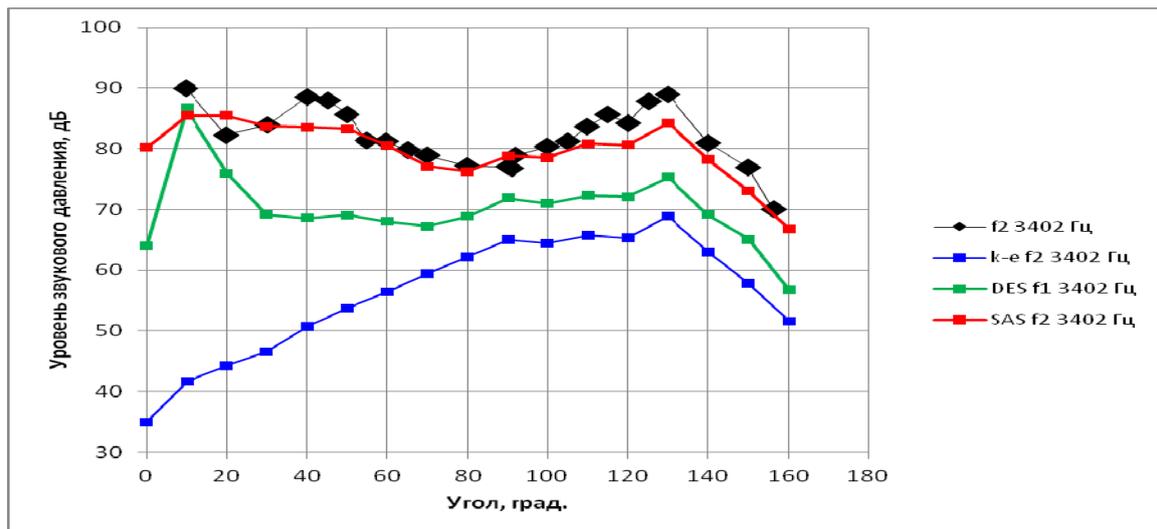


Рис. 13. Диаграмма направленности акустического излучения на второй гармонике для режима посадки

На режиме взлёта наиболее близкие к эксперименту результаты получены на модели SAS SST. В точке максимума акустического излучения (на угле  $50^\circ$ ) погрешность не превышает 10 дБ (на первой гармонике). Наибольшее отклонение получено на модели k-e, при этом в зоне максимума акустического излучения на первой гармонике наблюдается «провал» в расчётном уровне шума. Данное явление может быть связано с эффектом «отсечки» распространяющихся в переднюю полусферу акустических мод, поскольку модель k-e позволяет смоделировать только тональный шум.

Аналогичная картина наблюдается и на других режимах. Наилучшее совпадение получено на модели SAS SST, максимальное расхождение – на модели k-e. На режимах набора высоты и посадки погрешность относительно эксперимента на первой гармонике не превышает 5 дБ во всём диапазоне углов. Заниженный уровень шума в задней полусфере на второй гармонике для режимов взлёта и набора высоты может быть связан с затуханием акустических волн в выходном канале вследствие влияния схемной вязкости. Поэтому для расчёта на более высоких гармониках следует провести адаптацию расчётной сетки для разрешения акустических волн более высокой частоты.

### Заключение

Представленные результаты численного исследования шума модельного вентилятора подтверждают необходимость учёта широкополосной составляющей шума при прогнозировании акустических характеристик лопаточных машин. Предложенная модель расчёта является компромиссом между вычислительной стоимостью и точностью моделирования акустических источников и позволяет выполнять акустическое моделирование лопаточных машин для контроля их экологических параметров на стадии проектирования.

### Библиографический список

1. Коржнев В.Н., Милешин В.И., Почкин Я.С, Халецкий Ю.Д. и др. Экспериментальные исследования аэродинамических и акустических характеристик двухконтурного модельного вентилятора С180-2 с подпорными ступенями на стенде Ц-3А. Научно-технический отчёт ИЦАМ, 2011.

2. Rossikhin A., Pankov S., Brailko I., Mileschin V. Numerical investigation of high bypass ratio fan tone noise // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (June, 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany). 2014. V. 2A. DOI: 10.1115/GT2014-26354

3. Замтфорт Б.С., Рылько О.А., Сорокин Л.И., Шипов Р.А. Методика и программа расчёта шума ТРДД с большой степенью двухконтурности в стендовых условиях. Технический отчёт ЦИАМ № 7080, 1973.

## IMPACT OF THE TURBULENCE MODELING APPROACH ON THE ACCURACY OF THE FAN NOISE LEVEL PREDICTION

© 2018

**K. R. Pyatunin** Head of CAE Department;  
Public Joint-Stock Company UEC-Saturn, Rybinsk, Russian Federation;  
[kirill.pyatunin@uec-saturn.ru](mailto:kirill.pyatunin@uec-saturn.ru)

**N. V. Arkharova** Design Engineer of Aerodynamic and Aeroacoustic Team, CAE Department;  
Public Joint-Stock Company UEC-Saturn, Rybinsk, Russian Federation;  
[arkharova\\_nata@mail.ru](mailto:arkharova_nata@mail.ru)

The fan is the dominant source of noise for modern high bypass ratio aircraft engines. The article presents the results of investigating the influence of the approach to modeling the turbulence in modeling fan stage noise generation on the results of noise level prediction. Numerical investigation was performed for a model fan stage in test conditions in an anechoic chamber. Basic operating modes determining the acoustic performance of the fan were used. Calculation of far-field noise was performed using finite element modeling on the basis of the modal composition of generated noise. The influence of the turbulence model on the number and amplitude of acoustic modes excited in the flow on the fundamental frequency harmonics was analyzed. It is shown that modeling of the anisotropic flow turbulence in calculating non-stationary rotor-stator interaction makes it possible to obtain results close to the experimental ones.

*Bypass turbojet engine; fan; rotor-stator interaction; turbulence; acoustic modes; sound pressure level; numerical modeling.*

---

*Citation:* Pyatunin K.R., Arkharova N.V. Impact of the turbulence modeling approach on the accuracy of the fan noise level prediction. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 4. P. 102-114. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-102-114

### References

1. Korzhnev V.N., Mileschin V.I., Pochkin Ya.S., Khaletsky Yu.D. and etc. Experimental investigation of aerodynamic and acoustic performance of a model C180-2 bypass fan with booster stages using a C3A acoustic test facility. CIAM research / technical report, 2011.

2. Rossikhin A., Pankov S., Brailko I., Mileschin V. Numerical investigation of high bypass ratio fan tone noise. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (June, 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany)*. 2014. V. 2A. DOI: 10.1115/GT2014-26354.

3. Zamtfort B.S., Rylko O.A., Sorokin L.I., Shipov R.A. Method and program for noise prediction of high bypass ratio turbofan engine in test-bed conditions. CIAM technical report no 7080, 1973.