

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОДПОРНЫХ СТУПЕНЕЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ ТОНАЛЬНОГО ШУМА ВЕНТИЛЯТОРА АВИАДВИГАТЕЛЯ

© 2016

- Ю. Д. Халецкий** кандидат технических наук, начальник сектора акустики отделения «Аэродинамика компрессоров воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок», Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, yurikhalet@ciam.ru
- В. Н. Коржнев** кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отделения «Аэродинамика компрессоров воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок», Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
- Я. С. Почкин** инженер отделения «Аэродинамика компрессоров воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок», Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

Тональный шум взаимодействия вентилятора и подпорных ступеней компрессора низкого давления вносит значительный вклад в общий уровень шума авиационного двигателя, особенно на дозвуковых режимах. Этот шум обусловлен взаимодействием элементов вентилятора и бустера. Тональные составляющие на этих частотах являются результатом нелинейного взаимодействия вращающихся и неподвижных венцов. Поэтому в спектрах шума вентилятора кроме обычных тонов шума взаимодействия проявляются суммарные и разностные тоны. При исследовании акустических характеристик двухконтурного широкохордного вентилятора было обнаружено, что суммарные и разностные составляющие шума взаимодействия вентилятора с компрессором появляются на дозвуковых режимах и в основном распространяются в переднюю полусферу. Одной из особенностей реальной конструкции модели вентилятора является наличие лабиринтного уплотнения. На низких режимах работы вентилятора уплотнения такого типа открыты и пропускают некоторый поток воздуха. В результате картина течения перед ротором вентилятора искажается. Было экспериментально получено, что этот элемент конструкции на определённых режимах существенно влияет на генерацию тонального шума вентилятора и бустера. Влияние этих конструктивных особенностей вентилятора второго порядка значимости до сих пор не принимается во внимание в методах расчёта шума вентиляторов турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД). Однако было экспериментально установлено сильное влияние лабиринтного уплотнения на шум универсального стендового имитатора двигателя (УСИД). Работа выполнена с целью оценки влияния лабиринтного уплотнения на спектры шума УСИД на нерасчётном режиме его работы.

Двухконтурный газотурбинный двигатель, вентилятор, шум, спектры, подпорные ступени, лабиринтное уплотнение.

Цитирование: Халецкий Ю.Д., Коржнев В.Н., Почкин Я.С. Влияние конструктивных особенностей подпорных ступеней на генерацию тонального шума вентилятора авиадвигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 99-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-99-108

Введение

Конструкция осевого компрессора и вентилятора современного авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) состоит из подвижных и неподвижных элементов. Между статорными и роторными деталями компрессора существуют осевые и радиальные зазоры, так как ротор компрессора вращается в подшипниках, имеющих собственные конструктивные осевые и радиальные зазоры. Кроме того, подшипники ротора могут быть установлены в демпферных опорах, имеющих возможность дополнительного радиального перемещения. Поэтому зазоры между ротором и статором компрессора должны превышать возможные суммарные радиальные и осевые перемещения ротора относительно статора.

Статическое давление в проточной части осевого компрессора увеличивается за каждой последующей ступенью по сравнению с предыдущей, вследствие чего возникает перетекание воздуха через зазоры между роторными и статорными деталями на втулочной поверхности и далее – через внутренние полости втулки – вверх по потоку. В результате ухудшаются аэродинамические и акустические характеристики компрессора. Для сокращения расхода перетекающего воздуха от задних ступеней компрессора к передним применяются бесконтактные уплотнения.

Наиболее распространённым и относительно простым в изготовлении типом бесконтактных уплотнений является лабиринтное уплотнение, представляющее собой ряд гребней на роторе, разделённых камерами, и гладкую цилиндрическую поверхность над гребнями на статоре, на которую наносится срабатываемое покрытие, предотвращающее касание металла о металл. Уменьшение расхода воздуха, перетекающего между уплотняемыми полостями, происходит за счёт многократного дросселирования нежелательного потока воздуха при его прохождении по каналам с резко меняющимся проходным сечением. При наличии срабатываемого покрытия на статоре зазор между гребнями лабиринтного уплотнения на роторе и его неподвижной цилиндрической поверхностью может быть пренебрежимо малым. Однако такой зазор должен быть обеспечен на расчётном режиме, когда роторные детали компрессора имеют максимальный диаметр вследствие воздействия на них центробежных сил. На низких дозвуковых режимах воздействие центробежных сил на детали ротора будет значительно меньше. Поэтому зазор в лабиринтном уплотнении на этих режимах может увеличиться в несколько раз. При этом значительно увеличится нежелательный расход воздуха через лабиринтное уплотнение вследствие снижения эффективности дросселирования потока воздуха лабиринтным уплотнением.

Целью данной работы является экспериментальная оценка влияния нерасчётного режима работы лабиринтного уплотнения на спектры шума УСИД.

Экспериментальная установка

Работа выполнена на стенде, предназначенном для акустических и аэродинамических испытаний моделей вентиляторов авиадвигателей, включающем большую заглушенную камеру [1; 2]. Модель исследуемого вентилятора расположена внутри заглушенной камеры. Расстояние от задней стенки камеры до тестируемого объекта составляет 6 м (рис. 1). Такое расположение испытываемого объекта позволяет одновременно определять его акустические характеристики в передней и задней полусферах. Для устранения приземной турбулентности и обеспечения параметров входного потока полётным условиям на входе исследуемой модели вентилятора устанавливается противотурбулентное входное устройство (ПВУ).

Заглушенная камера стенда имеет следующие размеры: 16×15×5.0 м. Стены камеры покрыты пористым звукопоглощающим материалом, характеристики которого обеспечивают внутри камеры условия свободного звукового поля в диапазоне частот 200 Гц – 40 кГц. Свойства звукового поля внутри заглушенной камеры стенда были определены в присутствии испытываемого объекта (модели вентилятора), валопровода и другого оборудования.

Система сбора и обработки акустических данных стенда Ц-3А включает 24 измерительных канала. Микрофоны установлены на двух дугах радиусом 5.5 м в направлениях: 10-160° (рис. 1).

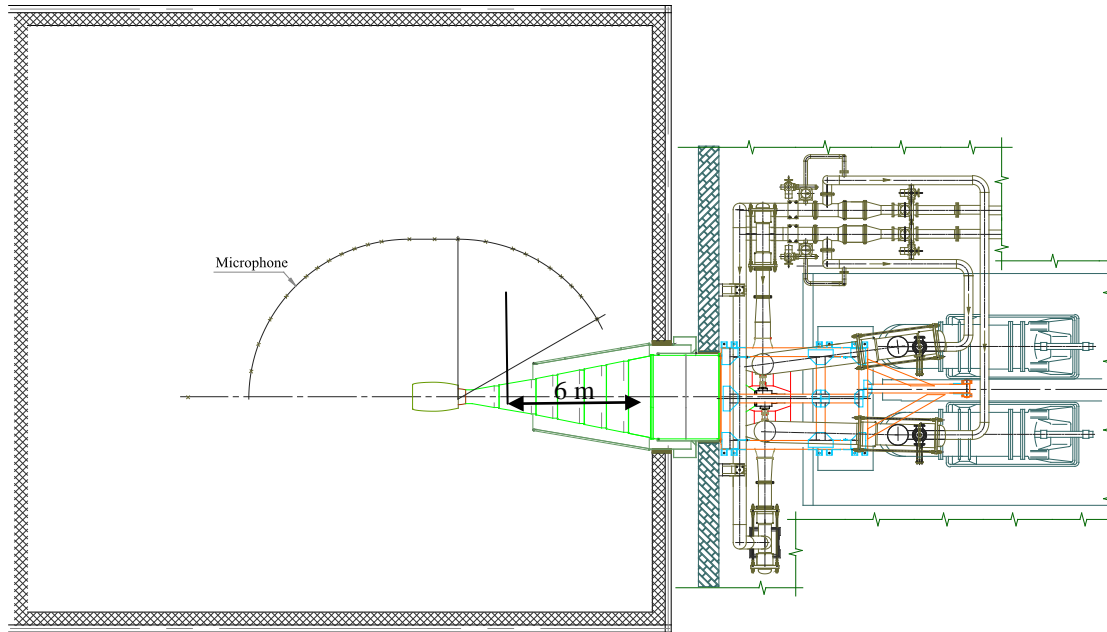


Рис. 1. План стенда для испытаний моделей вентиляторов ТРД с заглушенной камерой

Объект исследования

В качестве объекта исследования был использован универсальный стендовый имитатор двухконтурного двигателя. Его основными элементами являются однорядный вентилятор и трёхступенчатый компрессор низкого давления (КНД), расположенный во внутреннем контуре. Число лопаток рабочего колеса (РК) вентилятора равно 18, спрямляющего аппарата – 41. На рис. 2 представлен продольный разрез УСИД, а на рис. 3 – фрагмент УСИД в прямоугольной рамке – в укрупнённом масштабе конструкция бустера с лабиринтным уплотнением. Значения параметров УСИД на расчётном режиме приведены в табл. 1.

Таблица 1. Проектные значения параметров УСИД

1	Диаметр рабочего колеса модели	$D = 700$ мм
2	Окружная скорость вентилятора	$U_v = 396$ м/с
3	Степень двухконтурности ступени	$m = 8.5012$
4	Степень повышения полного давления вентилятора	$\pi_{вп}^* = 1.54$
5	Приведённый расход воздуха	$G_{пр} = 74.5$ кг/с
6	Приведённый расход воздуха через КНД	$G_{п} = 7.8344$ кг/с
7	Адиабатический КПД вентилятора на расчётном режиме	$\eta_{адп}^* = 0.92$

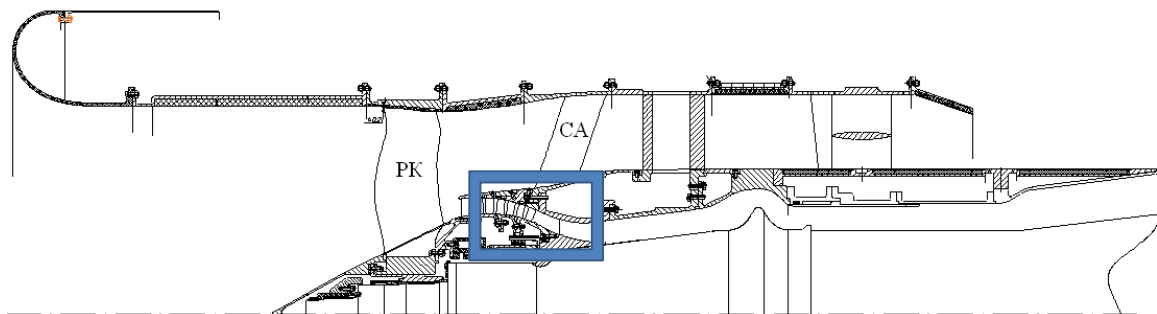


Рис. 2. Продольный разрез УСИД

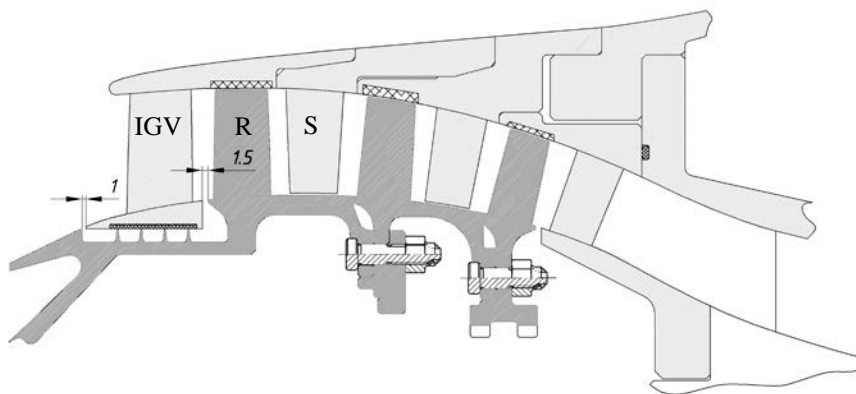


Рис. 3. Трёхступенчатый бустер с лабиринтным уплотнением

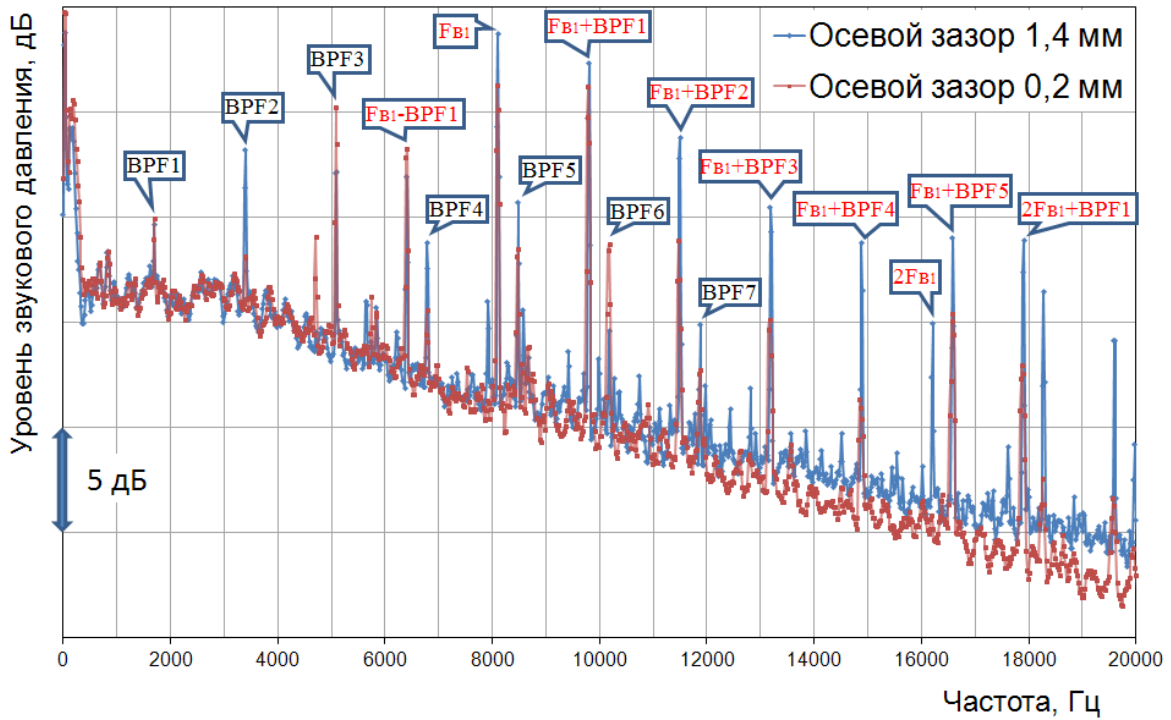
Особенности спектров шума двухконтурного УСИД с широкохордными лопатками

Спектр шума современного двухконтурного двигателя содержит тональный шум вентилятора и КНД на частотах следования и их гармониках, а также нелинейные тоны на «составных» частотах [3]. Генерируемый турбомашинами тональный шум является результатом взаимодействия РК и спрямляющего аппарата (СА) вентилятора, а также взаимодействия элементов вентилятора с другими вращающимися венцами. Обычно тональный шум двигателя, распространяющийся вниз по потоку, является шумом взаимодействия РК и СА вентилятора. Тональные составляющие, распространяющиеся в воздухозаборнике вверх по потоку и в дальнейшем излучаемые в переднюю полусферу, намного более многочисленны и сложны по происхождению [4]. Нисходящий след от лопатки вентилятора взаимодействует не только с СА, но и с венцами бустера. «Составные» частоты определяются суммой или разностью частот следования РК вентилятора и бустера или их гармоник. Роторы вентилятора и бустера, взаимодействуя между собой, генерируют значительное число суммарных и разностных тональных составляющих [5].

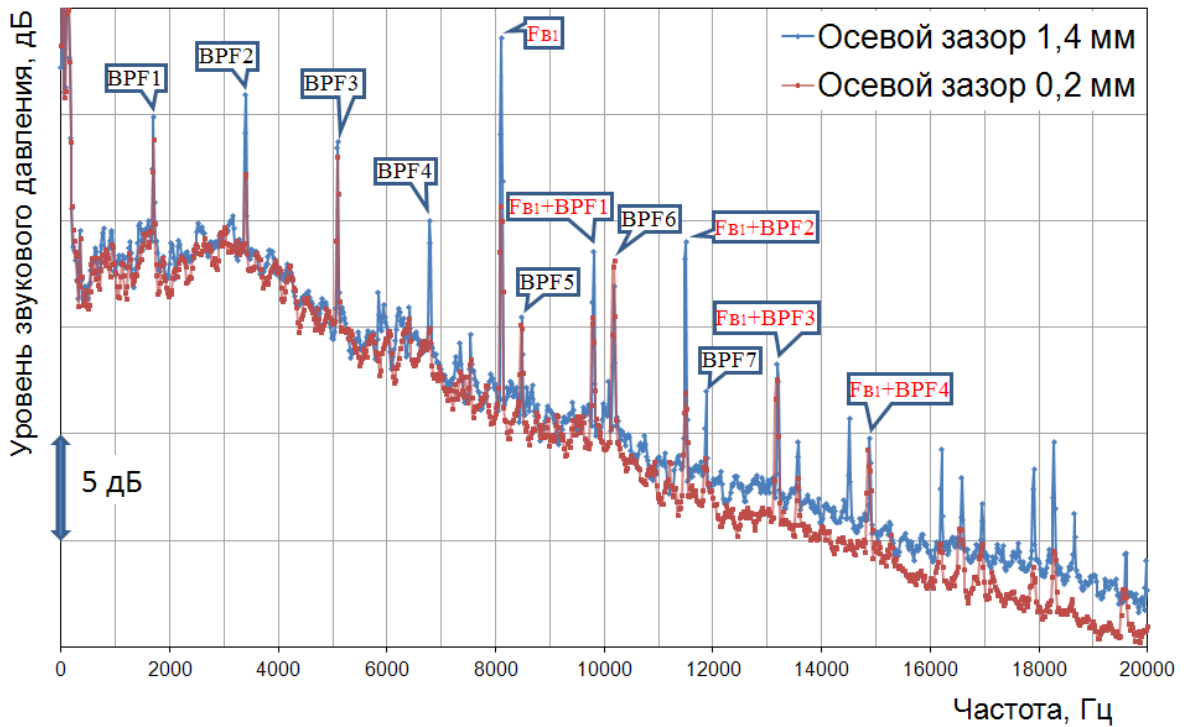
Условимся называть дозвуковыми режимами работы вентилятора такие, которые соответствуют окружной скорости ротора существенно меньше звуковой, а сверхзвуковыми режимами – выше звуковой. Предшествующий опыт исследования шума вентиляторов ГТД указывает на то, что на различных режимах работы вентилятора генерируются различные составляющие тонального шума. На дозвуковых режимах работы вентилятора тональный шум генерируется в основном при взаимодействии следов от лопаток рабочего колеса с лопатками спрямляющего аппарата и при попадании входной неравномерности на лопатки РК. Генерация тонального шума происходит на частоте следования и её гармониках.

При исследовании двухконтурного УСИД с широкохордными лопатками вентилятора на дозвуковых режимах тональный шум содержит большое число составляющих не только на частоте следования и её гармониках, но и на суммарных и разностных частотах следования вентилятора и бустера. На рис. 4, а представлен узкополосный спектр шума УСИД в передней полусфере на дозвуковом режиме ($U_e = 210$ м/с). Видно, что уровни тонов шума взаимодействия вентилятора и бустера F_{B1} ; $F_{B1+BPF1}$; $F_{B1+BPF2}$ даже превышают уровни тонов шума взаимодействия вентилятора.

Тональный шум УСИД, излучаемый в заднюю полусферу на том же дозвуковом режиме, также содержит тоны на частоте следования первого рабочего колеса бустера и на «составных» частотах типа $(F_{B1} + n \cdot BPF)$. Однако уровни тонов на «составных» частотах ниже уровней тонов на частоте следования вентилятора и её гармониках (рис. 4, б).



а



б

Рис. 4. Спектры шума УСИД на дозвуковом режиме:
а – направление излучения звука в переднюю полусферу (60°);
б – направление излучения звука в заднюю полусферу (120°)

Спектры шума двухконтурного УСИД на сверхзвуковом и околозвуковом режимах работы вентилятора, соответствующих взлётному режиму и режиму набора высоты, практически не отличаются от измеренных ранее акустических характеристик двигателей с одноступенчатым вентилятором. При сверхзвуковых значениях окружной скорости вентилятора спектры шума УСИД содержат интенсивные тоны на частоте следования и гармониках, широкополосную составляющую, а также шум ударных волн (рис. 5).

Влияние лабиринтных уплотнений на спектры шума УСИД

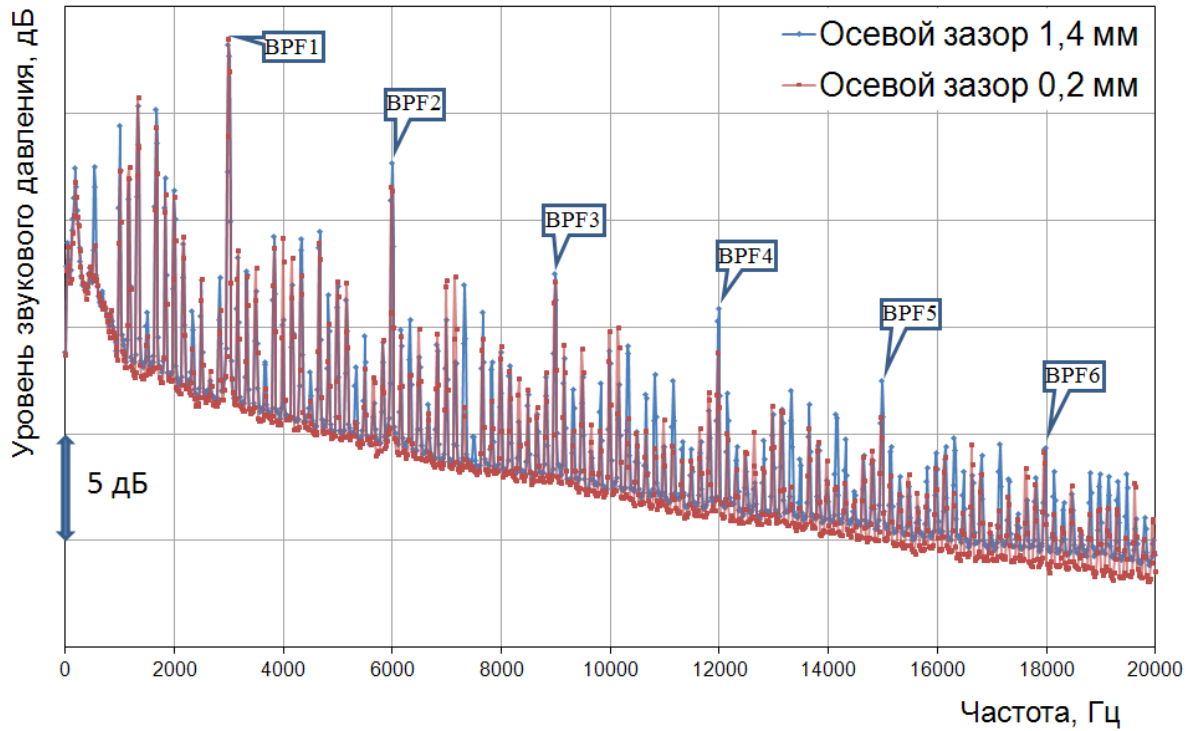
В конструкции УСИД лабиринтное уплотнение расположено под входным направляющим аппаратом КНД (рис. 3). Между роторными и статорными деталями на втулке бустера имеются осевые зазоры. Между гребешками лабиринтного уплотнения ротора и срабатываемым покрытием статора имеются радиальные зазоры, которые довольно значительны и составляют до 0.5 мм. Так как на расчётном режиме диаметр ротора увеличивается почти на 1 мм, то это приводит к уменьшению зазора в лабиринтном уплотнении практически до нуля. На частоте вращения ротора, соответствующей дозвуковым режимам работы УСИД, зазор в лабиринтном уплотнении практически равен монтажному зазору и данное лабиринтное уплотнение не работает.

Поскольку статическое давление на втулке за входным направляющим аппаратом (ВНА) больше, чем перед ним, на дозвуковых режимах происходит перетекание воздуха вверх по потоку через неработающее лабиринтное уплотнение. Вытекающий воздух индуцирует отрыв потока с втулочной поверхности ротора. Отрывное течение, проходя через ВНА, трансформируется в периодические вихревые структуры, которые затем попадают на лопадки рабочего колеса бустера и генерируют дополнительный тональный шум на частоте следования бустера (F_B). Кроме того, натекающий поток воздуха содержит следы от лопаток вентилятора, вращающиеся относительно лопаток ВНА с роторной частотой. Эта неравномерность потока создаёт пульсации давления в межлопаточных каналах ВНА с частотой следования лопаток РК вентилятора (BPF). Тональный шум на частоте следования лопаток рабочего колеса бустера (F_B) модулируется частотой следования лопаток вентилятора ($BPF1$). В результате в спектре шума вентилятора появляются две серии дополнительных тональных составляющих на частотах $(p \cdot BPF + q \cdot F_B)$ и $(p \cdot BPF - q \cdot F_B)$.

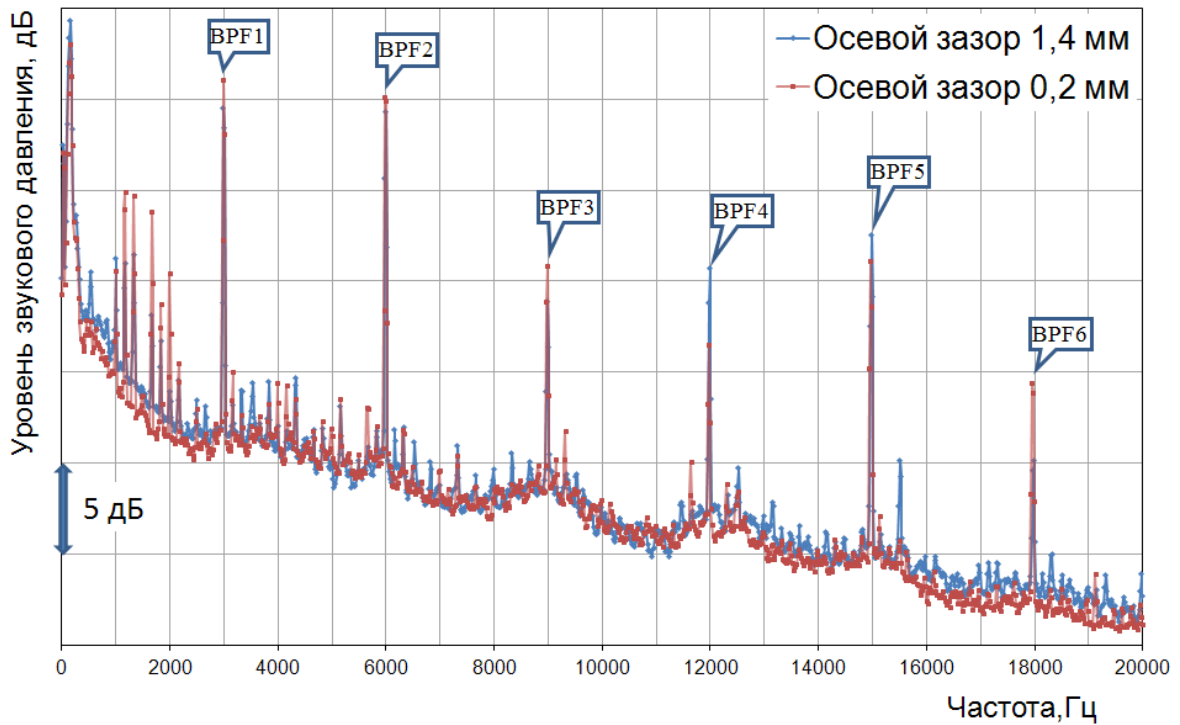
Для оценки влияния лабиринтного уплотнения на уровни шума УСИД была выполнена доработка корпуса ВНА, в результате которой осевой зазор был уменьшен с 1.4 до 0.2 мм. Эта доработка практически исключила перетекание воздуха. Вследствие этого снизился тональный шум на частоте следования лопаток первого рабочего колеса бустера и на составных частотах, связанных с этой частотой.

Третьоктавные спектры шума УСИД на дозвуковом режиме показывают, что и в передней (60°) и в задней (120°) полусферах при закрытии щели лабиринтного уплотнения во всём частотном диапазоне, за исключением одной третьоктавы, наблюдается снижение уровней шума (рис. 6).

Величина снижения различных тональных составляющих УСИД на дозвуковом режиме $U_\infty = 210$ м/с при почти полном закрытии осевых зазоров приведена в табл. 2.

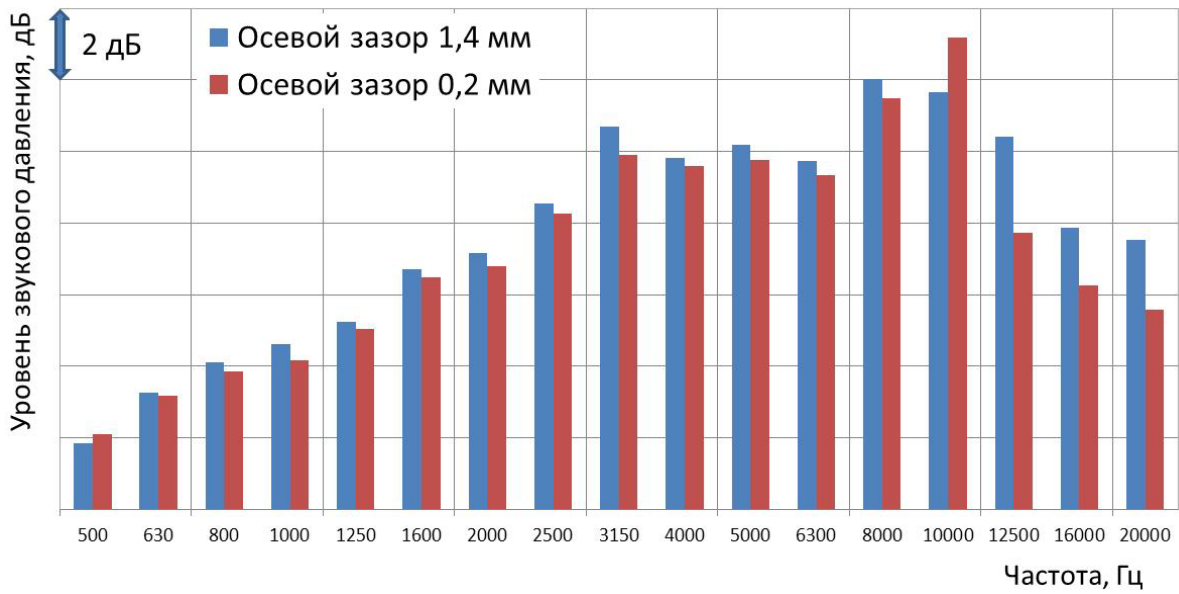


a

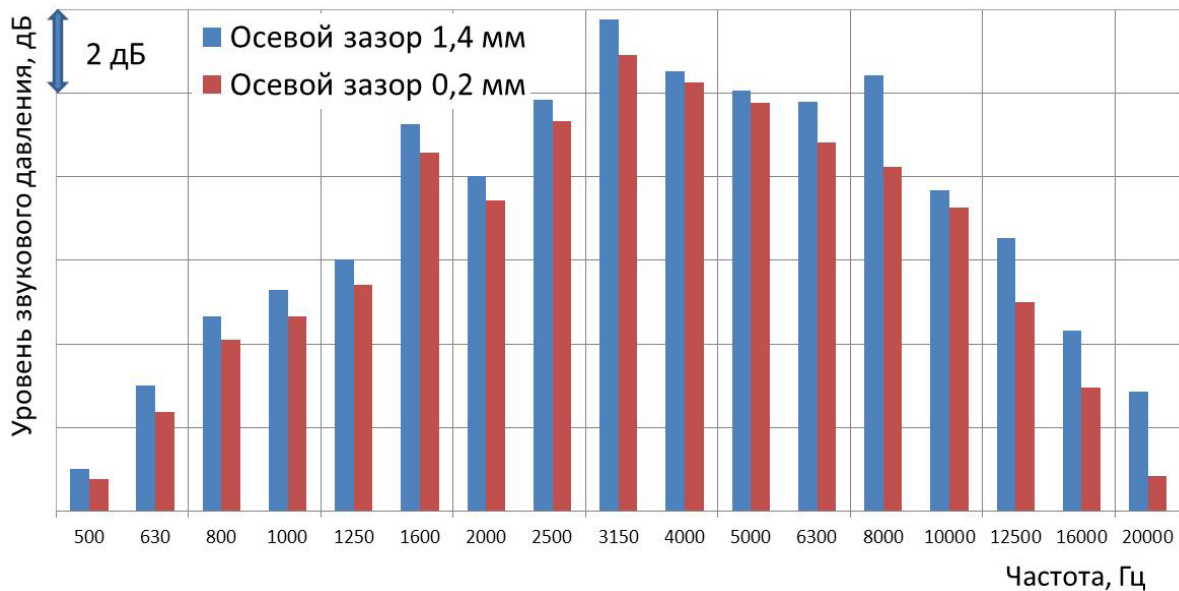


б

Рис. 5. Узкополосный спектр шума УСИД на сверхзвуковом режиме:
a – направление излучения звука в переднюю полусферу (60°);
б – направление излучения звука в заднюю полусферу (120°)



а



б

Рис. 6. Третьоктавные спектры шума УСИД на дозвуковом режиме:
а – направление излучения звука в переднюю полусферу (60°);
б – направление излучения звука в заднюю полусферу (120°)

Таблица 2. Снижение уровня тональных составляющих шума УСИД на дозвуковом режиме, распространяющихся в переднюю (60°) и заднюю (120°) полусферы, дБ

	BPF2	BPF4	BPF5	F _{В1}	2F _{В1}	F _{В1} +BPF1	F _{В1} +BPF2	F _{В1} +BPF3	F _{В1} +BPF4	F _{В1} +BPF5
60°	5.0	3.0	2.0	2.5	8.0	1.5	4.5	5.5	8.0	3.5
120°	4.0	5.0	-	8.0	-	3.0	7.0	-	-	-

Видно, что при перекрытии перетекания воздуха через лабиринтное уплотнение в направлении максимального излучения шума вентилятора в переднюю полусферу (60°) значительно снижаются тональные составляющие $BPF2$, $2F_{B1}$, $F_{B1}+BPF3$, $F_{B1}+BPF4$, а в направлении максимального излучения шума вентилятора в заднюю полусферу (120°) – $BPF4$; F_{B1} ; $F_{B1}+BPF2$. Можно заключить, что наличие лабиринтного уплотнения необходимо учитывать при расчёте уровня шума вентилятора ТРДД. Поскольку уплотнение такого типа практически является источником дополнительного шума двигателя, то разработчик может предусмотреть использование другого типа уплотнения, не приводящего к повышению уровня шума вентилятора, например, уплотнения щёточного типа.

Заключение

1. На дозвуковых режимах работы УСИД спектр шума двухконтурного вентилятора содержит, кроме тонального шума взаимодействия, нелинейные тоны взаимодействия вентилятора и бустера на «составных» частотах. Их вклад в уровень излучаемого шума двигателя на посадке составляет 1.8 дБ. Поэтому при оценке шума ТРДД, а также разработке системы шумоглушения двигателя необходимо учитывать наличие «составных» тонов. При частоте вращения вентилятора, соответствующей режимам набора высоты и взлёта, уровни тонов на «составных» частотах незначительны.

2. На дозвуковых режимах работы УСИД перетекание воздуха через лабиринтное уплотнение является причиной генерации дополнительного шума. Прикрытие осевых зазоров между подвижными и неподвижными элементами бустера привело к снижению уровня звуковой мощности на 0.6 дБ. При этом происходит существенное изменение излучаемого спектра шума УСИД, в частности, снижение нелинейных тонов на «составных» частотах. На практике в конструкции бустера рекомендуется использовать типы уплотнений, не приводящие к повышению уровня шума вентилятора.

Библиографический список

1. Khaletsky Yu., Mileshin V., Povarkov V., Shipov R. New acoustic facility for testing universal propulsion simulators // Proceeding of the 13th International Congress on Sound and Vibration. 2006. V. 2. P. 1431-1438.
2. Коржнев В.Н., Поварков В.И., Халецкий Ю.Д. Методические проблемы измерения шума моделей вентиляторов в заглушенной камере стенда Ц-3А ЦИАМ // Сб. статей «Экологические проблемы авиации». М.: Торус Пресс, 2010. С. 83-100.
3. Smith M.J.T. Aircraft Noise. Cambridge University Press, 1989. 359 p.
4. Philpot M.G. The role of rotor blade blockage in the propagation of fan noise interaction tones // 2nd Aeroacoustics Conference. 1975. DOI: 10.2514/6.1975-447
5. Morfey C.L. Sound transmission and generation in ducts with flow // Journal of Sound and Vibration. 1971. V. 14, Iss. 1. P. 37-55. DOI: 10.1016/0022-460x(71)90506-2

THE INFLUENCE OF BOOSTER DESIGN FEATURES ON AIRCRAFT ENGINE FAN TONAL NOISE

© 2016

- Yu. D. Khaletskiy** Doctor of Science (Engineering), Head of the Sector of Acoustics, Jet Engine Compressor Department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation, yurikhalet@ciam.ru
- V. N. Korzhnev** Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of the Jet Engine Compressor Department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation
- Ya. S. Pochkin** engineer of the Jet Engine Compressor Department, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

Fan and booster tonal noise makes significant contribution to the overall noise level of an aero engine, particularly in subsonic modes of operation. This noise is caused by the interaction not only of the fan rotor and stator, but also by the interaction of elements of the fan and booster. Tonal components at these frequencies are caused by nonlinear interaction of rotating and stationary blade rows. Therefore, fan noise spectra contain not only common fan tonal components at the blade passing frequency and its harmonics, but sum and difference tones of interaction between the fan and booster elements. In testing acoustic characteristics of a bypass wide-chord fan it was revealed that the sum and difference components of the fan and booster interaction noise appeared in subsonic operating modes and propagated basically in the forward hemisphere. Labyrinth seal is one of the features of the actual fan design. These seals are opened and let some airflow pass in low operating modes of the fan. As a result the flow pattern upstream the fan rotor is distorted. It was experimentally determined that the seal significantly affects the generation of the fan tonal noise in subsonic modes. So far, the impact of this fan design feature is not taken into account in fan noise prediction methods. However, we experimentally determined strong influence of labyrinth seals on the noise of the aero engine simulator. Experimental assessment of the influence of the labyrinth seal operating in off-design modes on UPS noise spectra is the purpose of this work.

Gas turbine engine, fan, noise, spectra, booster, labyrinth seal.

Citation: Khaletskiy Yu.D., Korzhnev V.N., Pochkin Ya.S. The influence of booster design features on aircraft engine fan tonal noise. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 99-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-99-108

References

1. Khaletsky Yu., Mileshin V., Povarkov V., Shipov R. New acoustic facility for testing universal propulsion simulators. *Proceeding of the 13th International Congress on Sound and Vibration*. 2006. V. 2. P. 1431-1438.
2. Korzhnev V.N., Povarkov V.I., Khaletskiy Yu.D. Metodicheskie problemy izmereniya shuma modeley ventilyatorov v zaglushennoy kamere stenda Ts-3A TsIAM. *Sb. statey «Ekologicheskie problemy aviatsii»*. Moscow: Torus Press Publ., 2010. P. 83-100. (In Russ.)
3. Smith M.J.T. Aircraft Noise. Cambridge University Press, 1989. 359 p.
4. Philpot M.G. The role of rotor blade blockage in the propagation of fan noise interaction tones. *2nd Aeroacoustics Conference*. 1975. DOI: 10.2514/6.1975-447
5. Morfey C.L. Sound transmission and generation in ducts with flow. *Journal of Sound and Vibration*. 1971. V. 14, Iss. 1. P. 37-55. DOI: 10.1016/0022-460x(71)90506-2