

Роль реактивного элемента в системе шумоглушения авиационного двигателя

Ю. Д. Халецкий* Я. С. Почкин

Центральный институт авиационного моторостроения. Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2

(Статья поступила 19.07.2017; Подписана в печать 20.09.2017)

В качестве глушителей шума авиационных двигателей широко используются сотовые звукопоглощающие конструкции (ЗПК), в последние годы — двухслойные. Разработанная в ЦИАМ конструкция глушителя представляет собой комбинацию традиционных сотовых двухслойных ЗПК и реактивного элемента в виде решетки пластин. Эксперименты показали, что в частотном диапазоне наибольшей чувствительности человеческого уха комбинированный глушитель снижает шум вентилятора на 2–3 дБ больше, чем сотовые двухслойные ЗПК той же длины. Эксперименты были проведены с использованием модели вентилятора авиационного двигателя в качестве источника шума. Другой реализацией реактивного глушителя являются надроторные устройства (НРУ), которые в авиационных двигателях нашли применение в качестве средства повышения газодинамической устойчивости компрессоров. Одной из наиболее успешных конструкций НРУ стала щелевая проставка, устанавливаемая над рабочим колесом. Было исследовано влияние надроторного устройства на шум осевого вентилятора современного авиадвигателя, а также на шум биротативного закапотированного вентилятора. Представлены результаты исследования влияния НРУ на шум модели биротативного закапотированного вентилятора при варьировании конструктивных параметров НРУ.

PACS: 43.28+h; 43.50+y. УДК: 621.45, 534.83

Ключевые слова: авиадвигатель, вентилятор, компрессор, сотовые звукопоглощающие конструкции, надроторное устройство, щелевой элемент.

ВВЕДЕНИЕ

Сотовые глушители шума вентиляторов ТРДД используют единственную идею — идею поглощения шума. При ограниченных размерах системы шумоглушения оптимальной, скорее всего, является некоторая комбинированная система, использующая идеи поглощения и отражения звука. Поэтому в последние несколько лет появились исследования именно таких — комбинированных — систем шумоглушения авиационных двигателей [1–3].

Звукопоглощающие облицовки весьма эффективны при поглощении мод высокого порядка, но малоэффективны при поглощении мод низкого порядка, то есть — волновых фронтов, распространяющихся вдоль канала под малыми углами относительно его стенок. Моды низкого порядка редко взаимодействуют со звукопоглощающими конструкциями при распространении вдоль канала. Поэтому, чтобы ослабить все моды низких порядков, требуется большая длина акустической облицовки, чем допускает конструкция канала авиадвигателя. Следовательно, снижение шума путем использования поглощающих ЗПК фактически ограничено модами относительно высоких номеров.

Комбинированные облицовки включают секции поглощающих и реактивных элементов (рис. 1). Последние трансформируют акустические моды низких номеров в некоторый набор мод, включающий моды высоких номеров. Расположенные ниже по течению ЗПК поглощают эти моды высоких номеров и рассеивают

их энергию в тепло. Основной механизм работы реактивных ЗПК состоит в том, что моды низких порядков реагируют с этими ЗПК, в результате чего частично трансформируются в моды высоких и низких номеров. Реактивные элементы имеют импеданс с малой действительной частью (малым сопротивлением лицевого листа) и с малой мнимой частью (реактансом). Представляется, что при импедансе около нуля или, по крайней мере, менее $0.5\rho c$, обеспечивается трансформация части мод низких номеров в моды высоких номеров (где ρ — плотность воздуха, и c — скорость звука в воздухе). Эти вновь созданные моды высоких номеров могут быть затем поглощены расположенными вниз по потоку поглощающими элементами.



Рис. 1: Комбинированный глушитель. Вид со стороны корпуса вентилятора

*E-mail: yurikhalet@ciam.ru

В качестве реактивных элементов глушителя могут использоваться весьма разнообразные конструк-

ции, включая решетчатые резонансные структуры, например, разработанный в ЦИАМ решетчатый глушитель [3], сотовые ЗПК с большой степенью перфорации лицевого листа, разного рода кольцевые полости на стенке канала и т.д.

Шум вентиляторов ТРДД является весьма высокочастотным и широкополосным шумом, как правило, переносимым набором нескольких основных энергонесущих азимутальных вращающихся мод. Это справедливо даже для основной роторной частоты вентилятора, акустическая энергия на которой связывается преимущественно с шумом ударных волн. Решетчатые конструкции, установленные в каналах кольцевого или круглого сечения, препятствуют распространению вращающихся акустических мод, переносящих основную часть шума, возбужденного турбомашинами.

Изолированный решетчатый глушитель обеспечивает близкий к единице коэффициент отражения вращающихся азимутальных мод, несмотря на то, что его решетка расположена заподлицо со стенкой воздухозаборного канала. В результате снижение шума на частоте следования лопаток в практически интересном диапазоне режимов выше $0.7N$ составляет 6–13 дБ. При снижении осевой протяженности решетчатого глушителя его осредненная по режимам эффективность на частоте следования лопаток хотя и снижается, однако, остается весьма высокой. Приблизительно при длине ниже 0.1 калибра канала его эффективность становится выше эффективности участка двухслойных ЗПК равной длины.

Другим примером применения реактивного глушителя является установка надроторного устройства в конструкции вентилятора авиационного двигателя. Одной из наиболее успешных конструкций НРУ стала щелевая проставка, устанавливаемая над рабочим колесом. Было исследовано влияние надроторного устройства на шум осевого вентилятора современного авиадвигателя, а также на шум биротативного закапотированного вентилятора. Представлены результаты исследования влияния НРУ на шум модели биротативного закапотированного вентилятора при варьировании конструктивных параметров НРУ.

Целью данной работы является экспериментальная верификация тезиса, в соответствии с которым при разработке системы шумоглушения современных авиационных двигателей применение реактивных элементов в ряде случаев может привести к повышению погонной акустической эффективности глушителей шума авиадвигателей.

1. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ ГЛУШИТЕЛЕЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ СОТОВЫХ ЗПК И РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Акустические характеристики различных конфигураций комбинированных глушителей были исследова-

ны на модели вентилятора авиадвигателя. Относительная длина глушителя перед рабочим колесом (РК) вентилятора составляла около половины калибра, что соответствует длине акустической облицовки в воздухозаборниках современных ТРДД.

Основная акустическая энергия, излучаемая вентилятором, сосредоточена на частоте следования лопаток вентилятора и ее гармониках, поэтому в качестве критерия оценки эффективности различных конфигураций глушителей использовалась величина снижения суммарного уровня шума в частотном диапазоне 2.5–20 кГц, который содержит наиболее энергонесущие составляющие шума вентилятора.

Были испытаны глушители шума, излучаемого в переднюю полусферу. Конструкция глушителей в одном случае состояла из однородных сотовых ЗПК длиной полкалибра, а в другом — устанавливались комбинированные глушители, состоящие из сотовых ЗПК длиной 1/4 калибра и реактивных элементов приблизительно той же длины. Сравнение спектров показывает, что на сверхзвуковом режиме 0.9 номинала, представляющем практический интерес, на частоте следования и в диапазоне излучения шума ударных волн комбинированные глушители имеют на 2–3 дБ большую эффективность, чем однородные сотовые глушители той же длины (рис. 2).

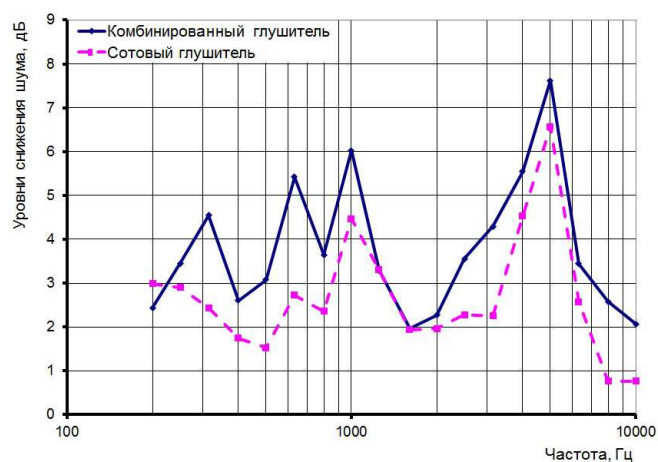


Рис. 2: Сравнение спектров снижения уровней шума модели вентилятора при установке глушителя в воздухозаборнике комбинированного (сплошная линия) и сотовых ЗПК (пунктирная линия)

Применительно к каналу наружного контура ТРДД акустические характеристики комбинированной системы шумоглушения были определены с использованием в качестве источника шума модели широкохордного вентилятора перспективного двигателя. Система шумоглушения состояла из двух решетчатых глушителей и расположенного между ними участка канала, облицованного двухслойными сотовыми ЗПК. Решетчатый глушитель закрыт акустически прозрачным перфорированным листом.

Для сравнительной оценки влияния комбинированной и сотовой систем шумоглушения вентилятора на уровне эффективно воспринимаемого шума гипотетического самолёта экспериментальные матрицы шума, полученные в заглушенной камере стенда Ц-3А, были скорректированы для полноразмерного двигателя. Коэффициент моделирования равен 2.71. Использовалась частотная коррекция уровней шума и поправка, учитывающая линейную зависимость уровней шума в дальнем поле от расхода воздуха. Сравнение эффективности комбинированной и традиционной сотовой систем шумоглушения подтвердило полученные ранее экспериментальные данные о том, что комбинированная система имеет определенное преимущество в эффективности над сотовыми двухслойными ЗПК. Расчеты уровней шума самолета показали, что эффективность комбинированного глушителя до 3.5 EPN dB выше по сравнению с однородными сотовыми ЗПК.

Таким образом, приведенные результаты модельных экспериментов показывают, что использование реактивных элементов в конструкции системы шумоглушения авиационного двигателя может привести к повышению ее акустической эффективности.

2. СНИЖЕНИЕ ШУМА ВЕНТИЛЯТОРА АВИАДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ УСТАНОВКИ НАДРОТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Другой реализацией реактивного глушителя являются надроторные устройства (НРУ), которые в авиационных двигателях нашли применение в качестве средства повышения газодинамической устойчивости компрессоров. Одной из наиболее успешных конструкций НРУ стала щелевая проставка, устанавливаемая над рабочим колесом [4]. Наиболее стабильного снижения шума вентилятора на различных режимах его работы было достигнуто при установке надроторного устройства в конструкцию закапотированного биротативного вентилятора. Эксперименты были выполнены на стенде, включающем большую заглушенную камеру [5]. Модель исследуемого вентилятора расположена внутри заглушенной камеры, что позволяет определять его акустические характеристики одновременно в передней и задней полусферах.

На режиме взлета возмужительное влияние НРУ наблюдается в широком диапазоне частот 1–20 кГц, т.е. практически во всем нормируемом диапазоне частот, и во всех направлениях излучения звука. Наиболее значительное снижение шума вентилятора наблюдается в третьоктавных полосах 2.0 кГц и 4.0 кГц, содержащих наиболее интенсивные тоны. В высокочастотном диапазоне 5–10 кГц все испытанные конфигурации НРУ имеют положительную эффективность, равную примерно 3 дБ.

Третьоктавная полоса с центральной частотой 2.0 кГц содержит тон на разности частоты следования бустера и первого РК вентилятора. В этой третьоктаве

все конфигурации НРУ снижают уровень шума, причем наибольшей акустической эффективностью обладает конфигурация с наибольшим коэффициентом заполнения решетки, равным 0.68. В передней полусфере в направлении 20° снижение уровня шума достигает максимума, равного 12 дБ, а в задней полусфере — 10 дБ.

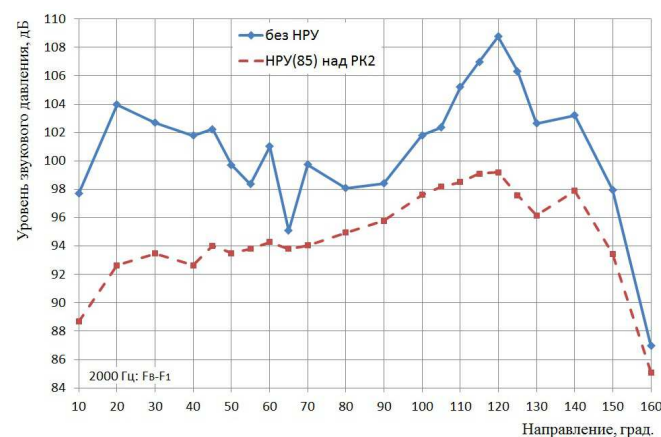


Рис. 3: Диаграммы направленности уровней шума биротативного вентилятора в 1/3-октаве с центральной частотой 2.0 кГц. Сплошная линия — без НРУ, пунктирная линии — с НРУ

Акустическая эффективность НРУ определяется в результате сравнения уровней звуковой мощности биротативного вентилятора без НРУ и с установленным только над вторым рабочим колесом НРУ. Представлены результаты для нескольких таких конфигураций НРУ, отличающихся параметрами решетки. Видно, что акустическая эффективность повышается с ростом коэффициента заполнения решетки на всех рассматриваемых режимах вентилятора (рис. 4). Следует также отметить, что при коэффициенте заполнения, равном 0.25, на режимах набора высоты и посадки установка НРУ вместо ожидаемого снижения шума вентилятора приводит к значительной его генерации, что неприемлемо для практического использования.

Коэффициент заполнения решетки (D) определяется по аналогии с электрическим импульсом как отношение ширины щели δ (ширины импульса) к шагу решетки t (периоду импульса). Коэффициент заполнения варьировался от 0.25 до 0.68. Дальнейшее повышение коэффициента заполнения нецелесообразно из соображений прочности конструкции НРУ. Безразмерная высота полости $\bar{H}$ определяется как отношение высоты полости H к общей высоте надроторного устройства. Эксперименты показали, что влияние этого параметра на величину снижения шума вентилятора не столь значительно как коэффициента заполнения. Рекомендуемая высота полости должна быть в пределах 0.5–0.7.

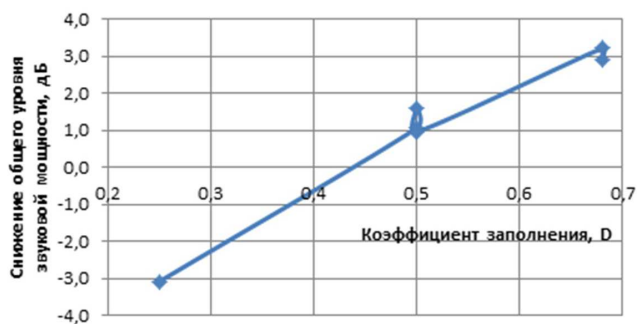


Рис. 4: Зависимость снижения общего уровня звуковой мощности от коэффициента заполнения решетки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конструкции современных авиационных двигателей непременным атрибутом является акустическая облицовка, как правило, состоящая из сотовых звукопоглощающих конструкций. На примерах двух конструкций системы шумоглушения авиадвигателей — комбинация глушителя и надроторного устройства — показано, что при использовании реактивных элементов системы шумоглушения возможно добиться повышения ее акустической эффективности.

- [1] Aeroacoustics of Flight Vehicles./ Ed. by Hubbard H.H. Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1995.
[2] Поварков В.И., Халецкий Ю.Д., Шипов Р.А. Патент № 2396441, 2010.
[3] Халецкий Ю.Д. Акуст. журн. 2012, **58**, № 4. С. 556.

- [4] Gelmedov F. S., Lokshtanov E. A., Olshtein L. E., Sidorkin M. A. European Patent specification. EP 0688 400 B1, 1997.
[5] Коржнев В.Н., Поварков В.И., Халецкий Ю.Д. Экологические проблемы авиации. / под ред. Ю. Д. Халецкого. С. 83. М.: Торус пресс, 2010,

The role of the reactive element in the engine noise reduction system

I. D. Khaletskii^a, Y. S. Pochkin

Central Institute of Aviation Motors. Moscow 111116, Russia
E-mail: ^ayurikhalet@ciam.ru

Honeycomb sound-absorbing liners are widely used as aircraft engine noise suppressors, and in recent years the two-layer structures have been used. The design of the liners, developed in CIAM, combines the traditional honeycomb liner and the reactive element in the form of a lattice of plates. Experiments have shown that, in the frequency range of human ear maximum sensitivity, the combined liner reduces the fan noise by 2–3 dB more effective than the two-layer honeycomb liners of the same length. The experiments were carried out using the 700 mm fan model as a noise source.

Another application of the reactive silencer is the casing treatments (CT), which have used as a means of increasing the gas-dynamical stability of aircraft engine compressors. One of the most successful designs of the CT was the slot type casing treatment, installed over the rotor. The effect of the CT on the axial fan noise of modern aircraft engine was investigated. It is also shown the effect of CT on the ducted counter rotating fan noise when the CT design parameters were varied.

PACS: 43.28+h; 43.50+y.

Keywords: slot element, honeycomb liner, casing treatment, turbofan.

Received 19 July 2017.

Сведения об авторах

1. Халецкий Юрий Данилович — канд. техн. наук, нач. сектора; тел.: (495) 362-41-74, e-mail: yurikhalet@ciam.ru.
2. Почкин Ярослав Сергеевич — мл. науч. сотрудник, тел.: (495) 362-90-33, e-mail: longz@list.ru.