

СНИЖЕНИЕ ШУМА ВЕНТИЛЯТОРА АВИАДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ НАКЛОНА ЛОПАТОК СПРЯМЛЯЮЩЕГО АППАРАТА

© 2015 г. Ю. Д. Халецкий, Я. С. Почкин

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова
111116 Москва, ул. Авиамоторная 2

E-mail: yurikhalet@ciam.ru

Поступила в редакцию 11.04.2014 г.

Приведены результаты экспериментального исследования акустических характеристик вентилятора авиадвигателя, в конструкции которого лопатки спрямляющего аппарата наклонены в окружном направлении. Получено, что конфигурация спрямляющего аппарата с наклоном лопаток по вращению рабочего колеса приводит к снижению шума вентилятора относительно конфигурации с прямыми лопатками спрямляющего аппарата, а конфигурация спрямляющего аппарата с наклоном лопаток против вращения рабочего колеса – к его повышению.

Ключевые слова: вентилятор, рабочее колесо, спрямляющий аппарат, двухконтурный турбореактивный двигатель, шум.

DOI: 10.7868/S0320791914060094

ВВЕДЕНИЕ

В современной практике проектирования авиационных двигателей практически всегда используется сочетание методов снижения его шума в источнике с методами, использующими механизмы поглощения и отражения звука по мере его распространения в каналах двигателя [1–3]. К первой группе можно отнести подбор числа лопаток рабочего колеса (РК) и спрямляющего аппарата (СА) вентилятора с целью выполнения условия отсечки тонального шума взаимодействия, выбор компромиссного осевого расстояния между ротором и статором, поскольку его увеличение, с одной стороны, приводит к снижению уровня шума, но с другой, – к увеличению массы двигателя. В последние годы появились публикации, в которых использование стреловидных и наклонных лопаток статора вентилятора (рис. 1) приводит к снижению генерируемого шума по сравнению с радиальными лопатками (см. обзор в [4]). Наклонные и стреловидные лопатки СА вентилятора были предложены для ослабления механизма взаимодействия следов ротора с лопатками статора. Стреловидность лопатки представляет собой осевое смещение лопатки СА таким образом, чтобы периферийная часть лопатки оказалась расположенной дальше по потоку, чем втулочная. Другими словами, стреловидность лопаток СА увеличивает осевой зазор на периферии, где окружная скорость наиболее высока. Наклон лопаток СА представляет собой окружное смещение набора лопаток относительно радиального направления. Предполагается, что угол наклона

положителен, когда лопатки статора наружного контура имеют наклон в направлении вращения ротора, и отрицателен в противном случае.

В одной из первых публикаций на эту тему было экспериментально показано, что наклон лопаток СА на 45.2° в направлении вращения ротора приводит к снижению уровня шума на 9 дБ [5]. В работе [6] были выявлены физические механизмы снижения шума вентилятора с наклонными и стреловидными лопатками СА. Показано, что вентилятор со стреловидными лопатками статора имеет преимущество над вентилятором с радиальными лопатками за счет увеличенного осевого зазора на периферии, а наклон лопаток в окружном направлении приводит к увеличению числа пересечений роторного следа с лопатками СА по размаху. Вследствие этого происходит дополнительное снижение амплитуды звуковой волны. На рис. 1а показан продольный разрез вентилято-

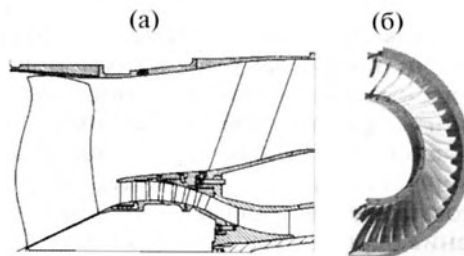


Рис. 1. Стреловидные (а) и наклонные в окружном направлении (б) лопатки СА.

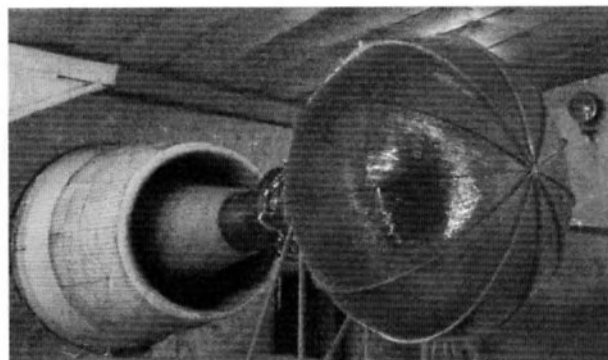
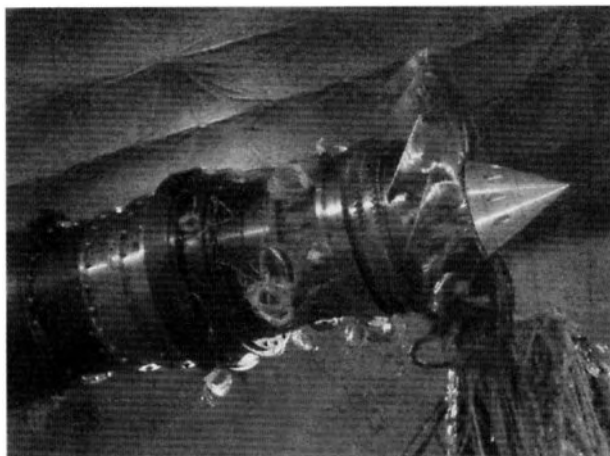


Рис. 2. Установленная на стенде ЦИАМ модель вентилятора: без мотогондолы (слева), с мотогондолой и противотурбулентным устройством на входе (справа).

ра, у которого СА имеет стреловидные лопатки, а на рис. 1б — СА с наклонными в окружном направлении лопатками.

В аэродинамической трубе на модели вентилятора диаметром 0.560 м было проведено исследование влияния наклона и стреловидности лопаток [7, 8]. Результаты показали, что применение СА со стреловидными и наклонными в окружном направлении лопатками, а также СА только со стреловидными лопатками, может значительно снизить уровень тонального шума взаимодействия, а также широкополосный шум. Причем наибольшее снижение шума наблюдалось в задней полусфере. Влияние конструкции лопаток СА оказалось даже более сильным, чем увеличение осевого зазора между РК и СА. В работе [9] было проведено теоретическое исследование распространения широкополосного шума через каскады с турбулентным потоком на входе. Результаты показали, что наклон лопаток в окружном направлении, по сравнению со стреловидностью, менее эффективно снижает широкополосный шум. В [10] было выполнено расчетно-экспериментальное исследование шума взаимодействия ступени компрессора с входным направляющим аппаратом. Показано, что положительный угол наклона лопаток СА в окружном направлении приводит к более значительному снижению уровней тонального шума, чем отрицательный. При этом на широкополосную составляющую шума компрессора угол наклона лопаток СА практически не влияет.

В данной работе проведена экспериментальная верификация метода снижения шума вентилятора путем наклона стреловидных лопаток СА в окружном направлении по вращению РК и в противоположную сторону. Несмотря на то, что в работе тестировалась модель вентилятора, ресурсы на ее выполнение были ограничены, поэтому варьирование угла наклона не предусматривалось.

Угол наклона лопаток СА выбран, исходя из условия, что аэродинамические характеристики вентилятора оставались не хуже, чем для его базовой конструкции.

СТЕНД Ц-3А ЦИАМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Работа выполнена на стенде с заглушенной камерой, предназначенном для акустических и аэродинамических испытаний моделей вентиляторов авиадвигателей [11, 12]. Модель исследуемого вентилятора расположена в заглушенной камере объемом 1150 м³, на расстоянии 6 м от задней стены камеры. Такое расположение испытуемой модели вентилятора позволяет одновременно определять акустические характеристики моделей вентиляторов в передней и в задней полусферах. Для устранения приземной турбулентности и обеспечения подобия потока полетным условиям на входе исследуемой модели вентилятора устанавливается противотурбулентное устройство (ПВУ). На рис. 2 слева показана находящаяся в процессе монтажа модель вентилятора без мотогондолы, а на рис. 2 справа — подготовленная к испытаниям модель вентилятора с установленным на входе ПВУ.

Заглушенная камера стенда имеет следующие размеры: 15.6 × 14.7 × 5.0 м. Стены камеры покрыты пористым звукопоглощающим материалом, характеристики которого обеспечивают внутри камеры условия свободного звукового поля. Система сбора и обработки акустических данных стенда Ц-3А включает 24 измерительных канала. Микрофоны установлены на двух дугах радиусом 4.0 м в направлениях: 10°–90° с центром на оси вентилятора относительно передней кромки рабочего колеса и 90°–60° — относительно сечения сопла (рис. 3).

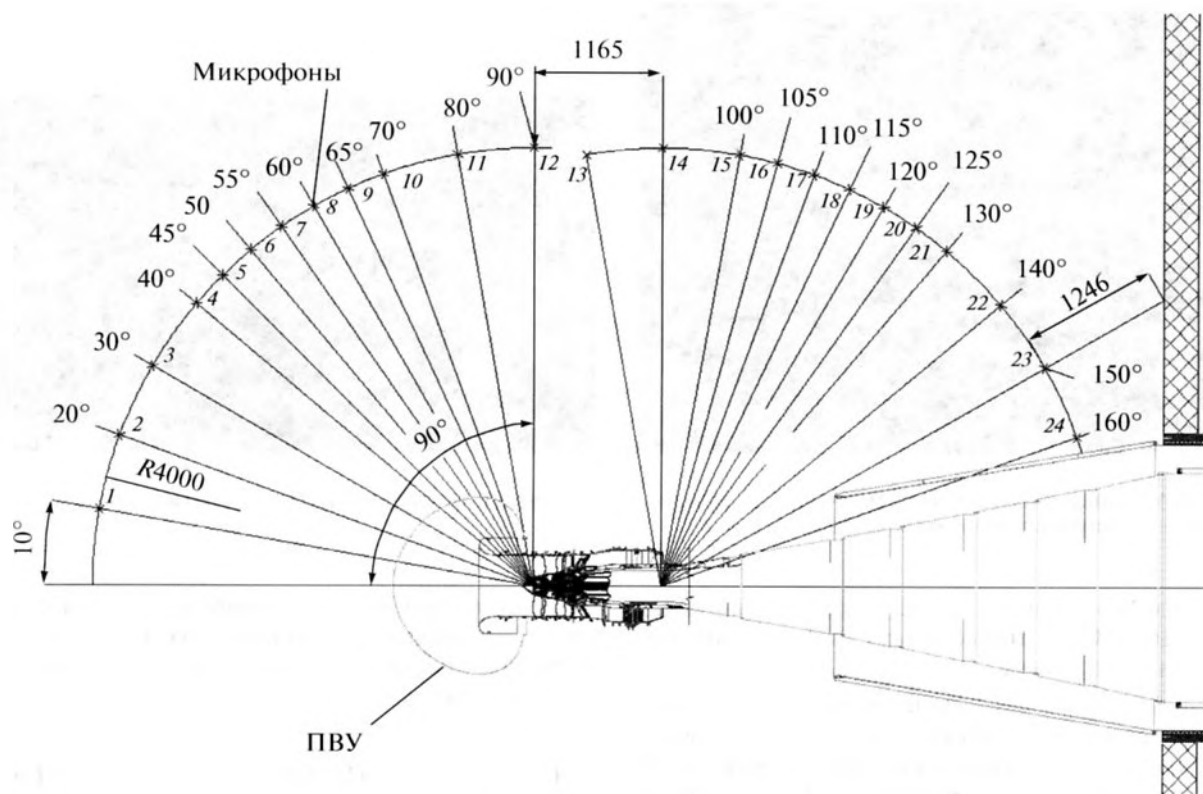


Рис. 3. Схема расположения микрофонов в заглушенной камере.

ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Программа исследования влияния наклона лопаток СА на шум вентилятора включала три конфигурации СА модели широкохордного вентилятора. В качестве базовой модели СА использовалась конструкция, состоящая из стреловидных лопаток без наклона в окружном направлении. Кроме того, были испытаны две конфигурации спрямляющего аппарата. Первая из них имела стреловидные лопатки с наклоном 30° относительно радиуса в направлении вращения РК, а другая конфигурация имела наклон лопаток против направления вращения РК (рис. 4).

Таблица 1. Параметры модели вентилятора на расчетном режиме

Диаметр модели вентилятора	700 мм
Число лопаток РК	18
Число лопаток СА	41
Окружная скорость вентилятора	395 м/с
Степень повышения полного давления	1.54
Расход воздуха	74.4 кг/с
Степень двухконтурности	8.5
Относительное удлинение лопатки РК	1.7

Профили у всех лопаток были примерно одинаковыми, но из-за смещения оси лопаток в окружном направлении разброс коэффициента восстановления полного давления находился в пределах 0.008 от величины коэффициента восстановления полного давления прямой лопатки базовой модели. В табл. 1 приведены конструктивные и газодинамические параметры модели вентилятора на расчетном режиме.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На стенде с заглушенной камерой были определены аэродинамические и акустические характеристики трех конфигураций СА модели широкохордного вентилятора. Режимы работы модели вентилятора приведены в табл. 2.

Для анализа результатов акустических измерений рассмотрим спектры шума модели вентилятора на сверхзвуковом, транзвуковом и дозвуковом режимах, соответствующих режимам работы вентилятора — “взлету”, “набору высоты” и “посадке”. Третьоктавные спектры шума модели вентилятора с тремя вариантами СА — базовый с прямыми лопатками и два варианта с наклонными лопатками — приведены на рис. 5–7.

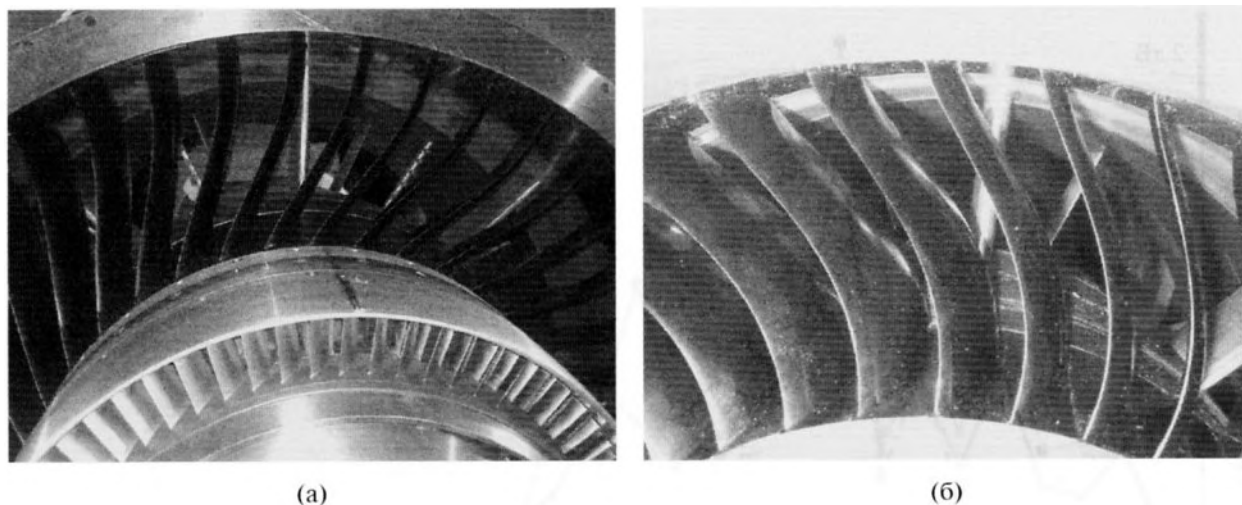


Рис. 4. Спрямляющий аппарат модели вентилятора с наклоном лопаток СА: (а) по вращению РК; (б) против вращения РК.

На сверхзвуковом режиме взлета получено, что в передней полусфере наклон лопаток не приводит к какому-либо изменению спектра. Зато в задней полусфере на частоте следования наклон лопаток в направлении вращения РК приводит к снижению шума на 2 дБ, а наклон лопаток в противоположном направлении приводит к его повышению примерно на ту же величину. Причем эта тенденция наблюдается практически во всем частотном диапазоне выше частоты следования (рис. 5). Подобная же картина наблюдается на трансзвуковом режиме набора высоты (рис. 6) и на дозвуковом режиме посадки (рис. 7).

Наиболее значимый эффект влияния наклона лопаток статора проявился на дозвуковом режиме посадки. В передней полусфере изменения уровней шума весьма незначительны, в задней полусфере снижение шума до 5 дБ наблюдается в широком диапазоне частот 2.0–12.5 кГц. Наклон лопаток СА в направлении, противоположном вращению вала, приводит к негативному результату, а наклон в направлении вращения – к позитивному результату (рис. 7).

Узкополосный анализ показал, что на сверхзвуковом режиме взлета в передней полусфере присутствует шум ударных волн. Однако на эти составляющие шума вентилятора, так же как и на

тональный шум на частоте следования и ее гармониках, наклон лопаток СА существенного влияния не оказывает. В задней полусфере наклон лопаток по вращению вала приводит как к значительному снижению тонального шума на частоте следования ВРФ1 и гармониках – ВРФ2, ВРФ3, так и к повышению его уровней на гармониках более высоких номеров ВРФ4, ВРФ5, ВРФ6 (рис. 8).

Позитивное действие наклона лопаток СА наиболее значительно проявляется на режиме посадки в задней полусфере в частотном диапазоне 2–12.5 кГц (рис. 9). Видно, что не только тоны на частотах ВРФ2, ВРФ3, ВРФ4 и ВРФ3 снижаются примерно на 5 дБ, но также и широкополосная составляющая снижается примерно на 2 дБ. Отметим также и негативную тенденцию – в области высоких частот на ВРФ5, ВРФ6 и на некоторых комбинационных частотах уровень шума вырос на 1–5 дБ.

На рис. 10 приведены графики зависимости уровня суммарного шума осевого вентилятора от режима его работы для трех испытываемых конфигураций СА. Доминирующий вклад в суммарный уровень шума вентилятора вносит тональный шум взаимодействия двух венцов РК–СА, поэтому до сверхзвуковых режимов четко прослеживается зависимость суммарного уровня шума

Таблица 2. Основные режимные параметры модели вентилятора

Режим	Отн. частота вращения вала, %	Частота вращения вала, n физ., 1/мин	Окружная скорость на периферии, м/с	Расход воздуха, кг/с
Посадка	53.9	5684	208	37
Набор высоты	82.0	8655	317	59
Взлет	95.4	10066	370	69

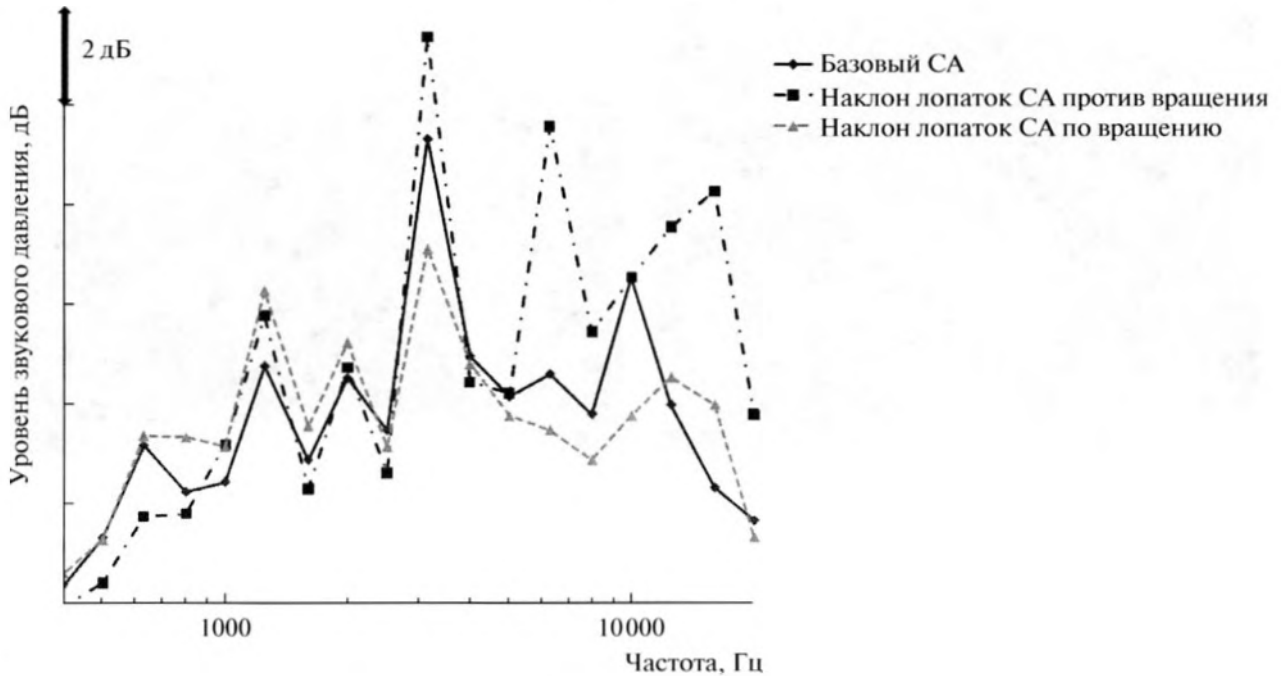


Рис. 5. Спектры шума модели вентилятора на режиме взлета в задней полусфере (110°).

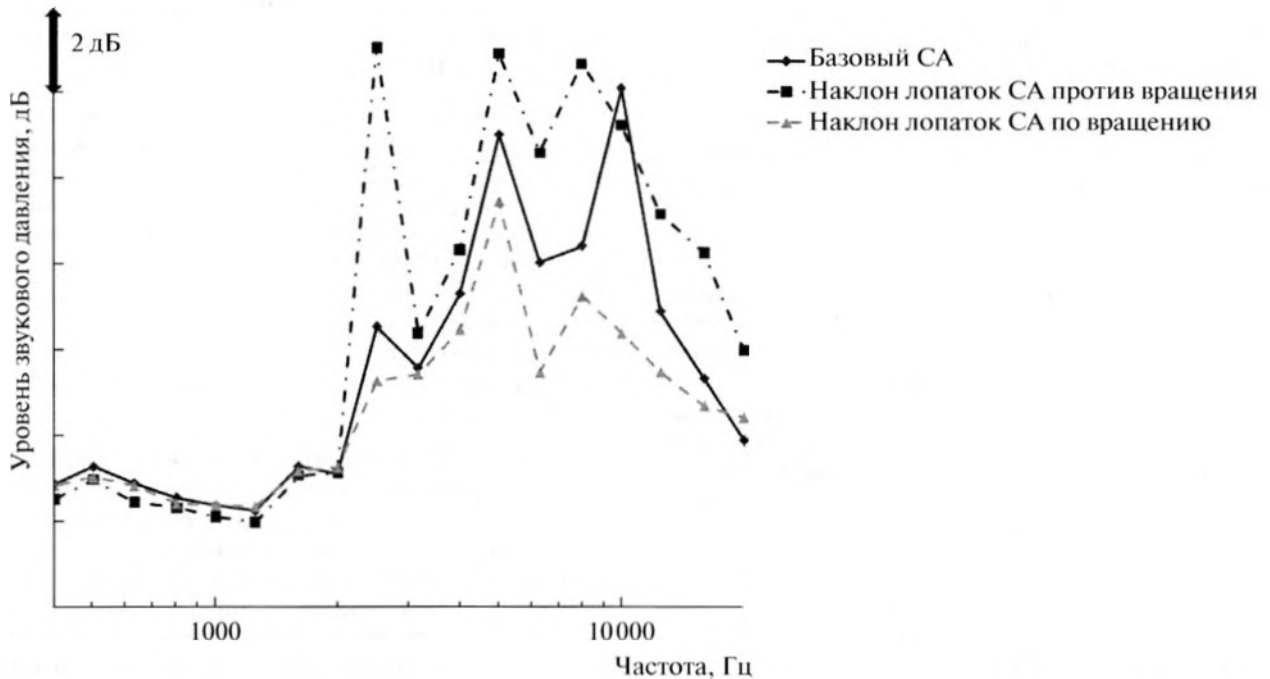


Рис. 6. Спектр шума модели вентилятора на режиме набора высоты в направлении 110° .

вентилятора от пятой степени окружной скорости лопаток РК на периферии. Но здесь нам важно было показать, что на всех режимах на изменение конструкции СА одинаково реагирует такой консервативный показатель, как суммарный уровень шума.

Для выполнения расчетной оценки влияния наклона лопаток СА вентилятора на уровни воспринимаемого шума гипотетического самолета экспериментальные матрицы шума, измеренного в дальнем поле, были скорректированы для полноразмерного двигателя. Коэффициент модели-

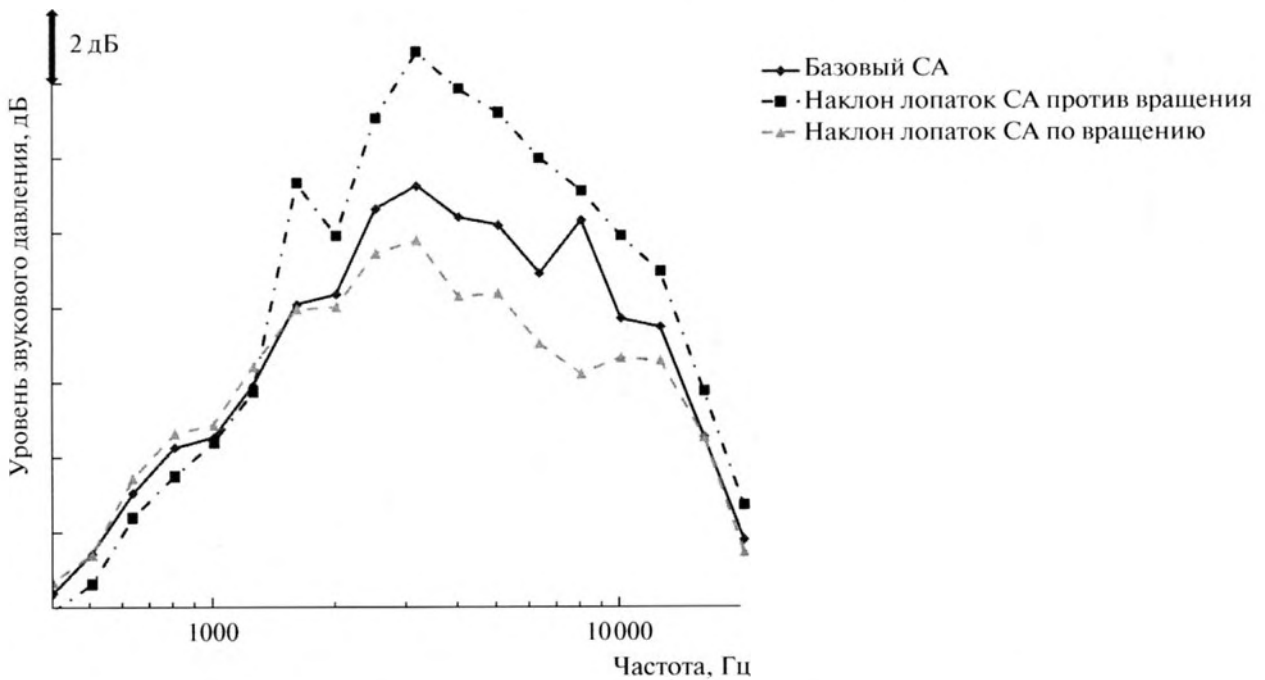


Рис. 7. Спектр шума модели вентилятора на режиме посадки в направлении 110° .

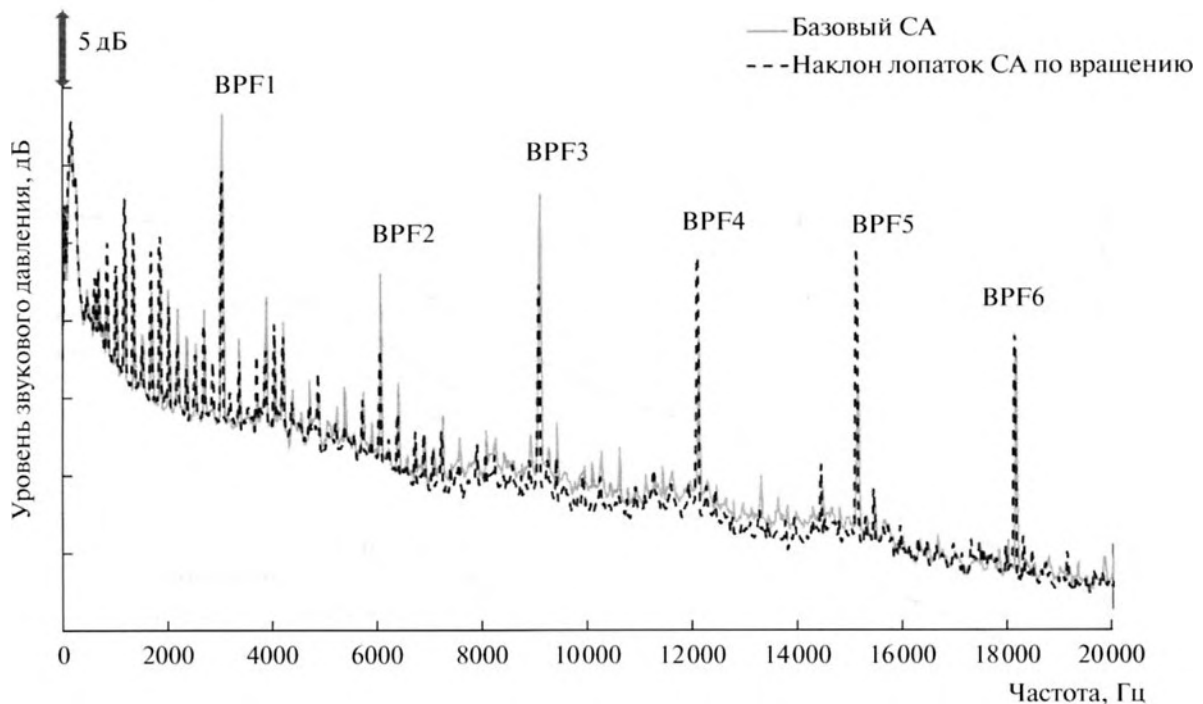


Рис. 8. Узкополосные спектры шума модели вентилятора С180-2 на режиме взлета в направлении 110° .

рования был равен 2.71. Использовалась частотная коррекция уровней шума и поправка, учитывающая линейную зависимость уровней шума в дальнем поле от расхода воздуха. Результаты рас-

четов приведены в табл. 3. Интегральная оценка, выраженная в уровне воспринимаемого шума, показала, что наклон лопаток СА на 30° в сторону вращения ротора приводит к снижению шума на

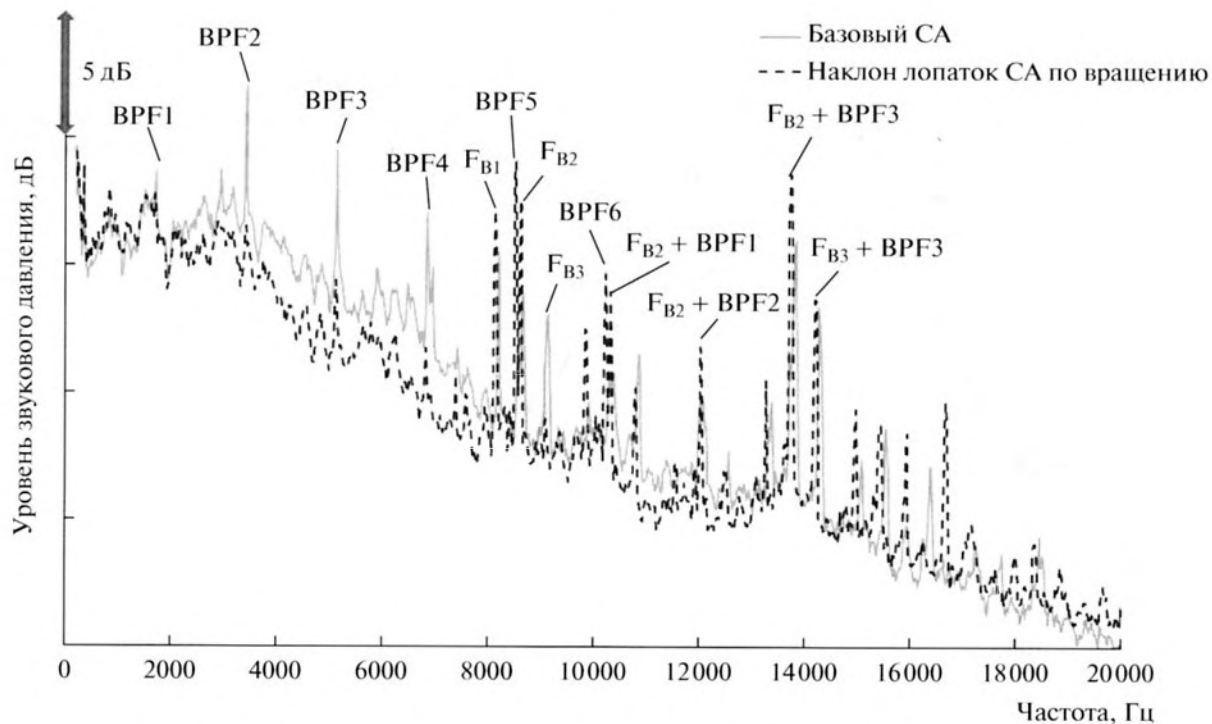


Рис. 9. Узкополосные спектры шума модели вентилятора С180-2 на режиме посадки в направлении 110° . (F_{B1} , F_{B2} , F_{B3} – частоты следования лопаток первого, второго и третьего рабочих колес подпорных ступеней компрессора низкого давления).

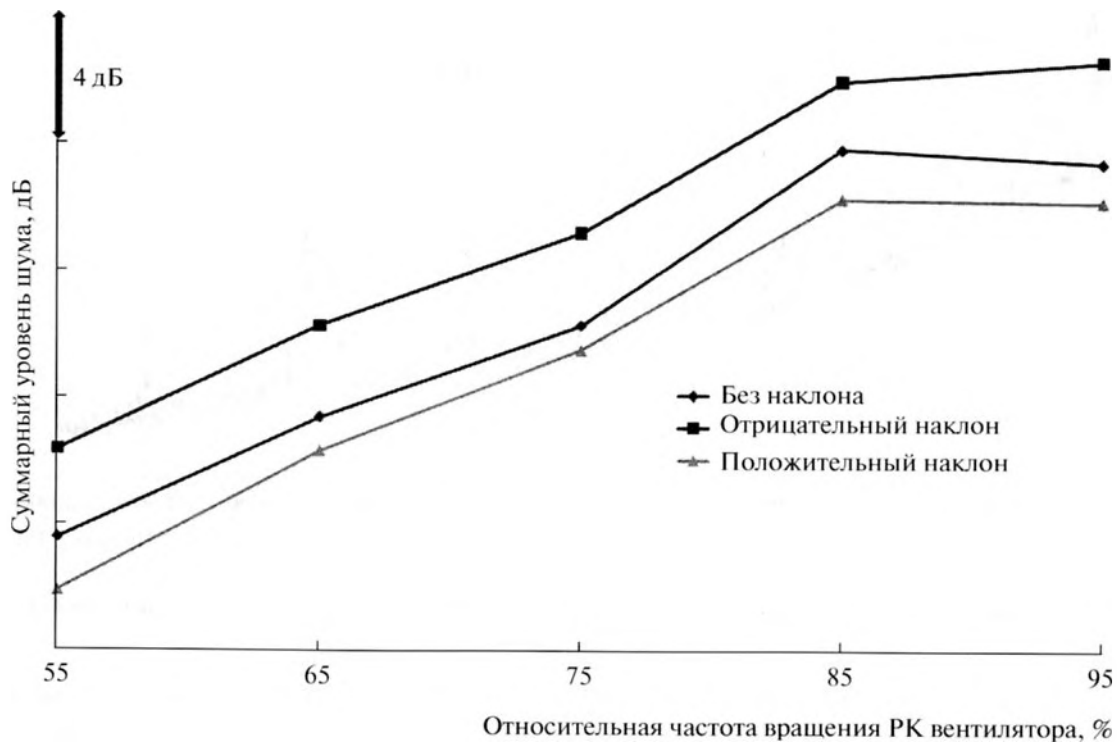


Рис. 10. Суммарный уровень шума модели вентилятора при изменении частоты вращения вала.

Таблица 3. Относительная оценка уровней шума самолета, EPNdB

Конфигурация СА	Взлет	Набор высоты	Посадка	Сумма
СА с наклоном лопаток по вращению ротора	-0.3	-0.2	-1.6	-2.1
СА с наклоном лопаток против вращения ротора	+1.0	-0.9	+0.9	+1.0

2.1 EPNdB, а наклон лопаток СА на 30° против вращения ротора – к росту шума на 1.0 EPNdB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью разработки технологии, приводящей к снижению шума вентиляторов ТРДД, использующей наклон лопаток СА, проведен цикл экспериментов на вентиляторном стенде с заглушенной камерой. Получено, что наиболее существенный выигрыш от применения этой технологии проявляется в конфигурации СА с наклоном лопаток в сторону вращения ротора на режиме посадки в задней полусфере в частотном диапазоне 2–12.5 кГц. Примерно на 5 дБ снижаются тоны на гармониках частоты следования лопаток вентилятора, и примерно на 2 дБ снижается широкополосная составляющая. Расчетная оценка шума самолета подтвердила этот вывод, именно за счет выигрыша на посадке кумулятивный шум перспективного самолета с конфигурацией СА с наклоном лопаток в сторону вращения ротора становится ниже на 2.1 EPNdB относительно базовой конфигурации СА без наклона лопаток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халецкий Ю.Д. Акустическая эффективность комбинированных глушителей шума авиационных двигателей // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 556–562.
2. Осипов А.А., Реент К.С. Математическое моделирование распространения звука в проточном канале с импедансными стенками // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 509–524.
3. Белов В.Д., Мигун Ю.Г., Орлов А.И. Гибридный активно-пассивный звукопоглотитель // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 419–424.
4. Envia E. Fan noise reduction: an overview // J. Internat. Aeroacoust. 2002. V. 1. № 1. P. 43–64.
5. Rao G.V.R. Use of leaning vanes for fan noise reduction / 10th Aerospace Sciences Meeting. San Diego, USA. 1972. AIAA Pap. 72-126. P. 1–16.
6. Envia E. Nallasamy M. Design selection and analysis of a swept and leaned stator concept // J. Sound Vibr. 1999. V. 228. № 4. P. 793–836.
7. Woodward R.P., Elliott D.M., Hughes C.E., Berton J.J. Benefits of swept-and-leaned stators for fan noise reduction // J. Aircraft. 2001. V. 38. № 6. P. 1130–1138.
8. Woodward R.P., Gazzaniga J.A., Bartos L.J., Hughes C.E. Acoustic benefits of stator sweep and lean for a high tip speed fan / 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. USA. 2002. AIAA Pap. 2002-1034. P. 1–11.
9. Hanson D.B. Theory for broadband noise of rotor and stator cascades with inhomogeneous inflow turbulence including effects of lean and sweep // NASA. 2001. CR-2001-210762.
10. Liu Hai-jian, Ouyang Hua, Wu Yadong, Tian Jie, Du Zhao-hui. Investigation on aeroacoustics and aerodynamics of the stator lean effect for rotor–stator interaction / Proceedings of the ASME Turbo Expo Conference. San Antonio, USA. 2013. GT2013-94554.
11. Mileshin V., Khaletskiy Y., Shipov R. New acoustic facility for testing universal propulsion simulators / Proceeding of the 13th International Congress on Sound and Vibration. Wien. 2006. № 142.
12. Khaletskiy Y.D., Mileshin V.I. Experimental study of 700-mm fan model noise at CIAM anechoic chamber / Proceedings of the ASME Turbo Expo Conference. San Antonio, USA. 2013. GT2013-94454.