

Экспериментальное исследование воздействия надроторных устройств щелевого типа для улучшения аэродинамических и акустических характеристик перспективных вентиляторов

Милешин В.И., Марков С.А., Коржнев В.Н., Халецкий Ю.Д.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: vimileshin@ciam.ru

Целью работы являлась оптимизация конфигурации надроторного устройства (НРУ) для одновременного повышения КПД, газодинамической устойчивости вентилятора и использования НРУ в качестве глушителя шума реактивного типа. Спроектированы и экспериментально исследованы три варианта НРУ щелевого типа применительно к модели однорядного вентилятора С179-2 для двухконтурного двигателя. В аэродинамических и акустических испытаниях исследовано влияние количества рядов НРУ, геометрии щелей, их взаимного расположения и высоты кольцевой полости НРУ на основные характеристики модели вентилятора С179-2. Все исследованные НРУ существенно (на 8...16%) повышают запас газодинамической устойчивости вентилятора на средних и высоких режимах, определяемых приведенной частотой вращения (75...100%), повышение КПД составило 1...2%. Анализ узкополосных спектров шума и диаграмм направленности показал, что применение НРУ данного типа существенно улучшает акустические характеристики вентилятора. Суммарно по трем сертификационным режимам снижение звуковой мощности модели вентилятора С179-2 составило 3 дБ.

Ключевые слова: надроторное устройство, акустические характеристики, снижение уровня шума, аэродинамические характеристики, коэффициент полезного действия, газодинамическая устойчивость, перспективный вентилятор, вентилятор двухконтурного двигателя, турбореактивный двухконтурный двигатель

Experimental investigations on the effect of slot-type casing treatments with the aim of improvement the aerodynamic and acoustic characteristics of advanced fans

Mileshin V.I., Markov S.A., Korzhnev V.N., Khaletskii Yu.D.

CIAM, Moscow

This work aims at optimization of the casing treatment (CT) configuration to simultaneously improve efficiency, a fan's stall margin, as well as the use of this CT as a reactive type silencer to reduce fan noise. Three versions of a slot-type CT are designed and tested for the model of C179-2 fan used in a bypass engine. The influence of the number of CT rows, geometry of the slots, their relative position and the height of the CT's annular cavity on the main characteristics of the C179-2 model fan was studied in aerodynamic and acoustic tests. All studied CTs significantly (by 8...16%) increase the fan's stall margin at moderate and high modes, determined by corrected rotational speed (75...100%), and efficiency increased by 1...2%. Analysis of narrow-band noise spectra and directional patterns showed that the use of this type of CT significantly improves acoustic characteristics of the fan. In total, across to the three certification modes, the sound power of the C179-2 fan model was reduced by 3 dB.

Keywords: casing treatment, acoustic characteristics, noise reduction, aerodynamic characteristics, efficiency, stall margin, advanced fan, bypass engine fan, bypass turbofan engine

Введение

С 1950-х годов с увеличением степени повышения давления в компрессорах газотурбинных двигателей (ГТД) и усложнением условий эксплуатации, ростом неравномерности потока на входе, ведется поиск способов повышения газодинамической устойчивости компрессоров. Наряду с классическими способами регулирования компрессоров – поворотом лопаток статора и перепуском воздуха – разрабатывались надроторные устройства (НРУ), не требующие принудительного управления и предназначенные для предотвращения развития локального отрыва потока на лопатках [1; 2]. Эффективность применения НРУ щелевого типа для увеличения запаса ГДУ, повышения КПД и даже улучшения акустических характеристик вентиляторов показана в [3; 4].

Сложность течения в компрессоре, особенно в области режимов возникновения и развития срыва потока, его пространственный характер, большая завихренность, нестационарность и вязкость потока пока не позволили создать метод аэродинамического расчета и проектирования НРУ. Опубликовано значительное количество работ, посвященных детальному исследованию вязкого нестационарного 3D-течения в ступенях осевых компрессоров с НРУ разного типа, рассмотрению аэродинамических аспектов воздействия НРУ на течение [5–15].

В настоящей работе описано разработанное в ЦИАМ надроторное устройство, изложены принципы его функционирования и обобщены результаты экспериментальных исследований. Исследовано воздействие НРУ не только на аэродинамические, но и на акустические характеристики вентиляторов и компрессоров.

Исследования с целью применения надроторных устройств типа щелевой проставки в качестве реактивного глушителя шума вентилятора авиационного двигателя ведутся в ЦИАМ уже довольно продолжительное время – с начала 2000-х годов. Одним из наиболее успешных примеров применения НРУ в этом качестве является их установка над вторым рабочим колесом биротативного вентилятора. Было обнаружено, что величина снижения шума вентилятора существенно зависит от конструктивного параметра, определяемого как отношение ширины щели НРУ к шагу решетки НРУ [16–18]. Для лучших однорядных НРУ с точки зрения снижения шума вентилятора характерно высокое значение этого параметра – не менее 0,6 [17].

Традиционные надроторные устройства, разрабатывавшиеся в ЦИАМ, имели однорядный щелевой участок. В 2016 г. были изготовлены первые НРУ, предназначенные для модели биротативного вентилятора CRTF1, созданного в рамках европейской программы VITAL [19–21]. На стенде ЦИАМ прошли аэродинами-

ческие и акустические испытания вентилятора CRTF1, показавшие высокую аэродинамическую и акустическую эффективность этих НРУ [16].

В 2017 г. для вентилятора CRTF1 были разработаны надроторные устройства, имеющие два расположенных друг за другом щелевых участка, объединенных одной общей полостью. Помимо высоких аэродинамических характеристик – КПД и запаса ГДУ, – все конфигурации указанных НРУ показали устойчивое снижение шума модели вентилятора на основных режимах сертификации [17].

В 2018 г. было разработано надроторное устройство для модели однорядного вентилятора С179-2 [18; 22; 23]. Новое, комбинированное НРУ имело три расположенных друг за другом щелевых участка, объединенных одной общей полостью. Особенностью ступени вентилятора С179-2 является высокая окружная скорость, $U_b = 400$ м/с, поэтому геометрические параметры НРУ, найденные для биротативного вентилятора с $U_b = 284$ м/с, потребовали коррекции.

В настоящей работе исследуются аэродинамические и акустические характеристики модели вентилятора С179-2 с тремя усовершенствованными конфигурациями трехрядного надроторного устройства, спроектированными с помощью полумпирического метода [24]. НРУ обладает следующими свойствами:

- увеличивает запас газодинамической устойчивости, не снижая КПД и расход воздуха на режимах близких к проектному;
- более эффективно при воздействии на вентилятор внешних возмущений;
- повышает аэроупругую устойчивость лопаток ротора, над которым установлено;
- снижает пульсации потока;
- улучшает акустические характеристики вентилятора.

Объект испытаний и порядок проведения эксперимента

Объект испытаний представляет собой однорядный вентилятор для двухконтурного турбореактивного двигателя с четырьмя подпорными ступенями (бустер) компрессора низкого давления (КНД) [22; 23; 25].

Параметры модели С179-2 в расчетной точке

Диаметр рабочего колеса D , мм	700
Приведенная частота вращения рабочего колеса $n_{пр}$, об/мин	10 550
Степень повышения полного давления в наружном контуре $\pi_{в II}^*$	1,4985
Суммарный приведенный расход воздуха $G_{пр}$, кг/с	72,4298
Адиабатический КПД наружного контура $\eta_{ад II}^*$	0,9166

Степень повышения полного давления в КНД (вентилятор + бустер) π_{6I}^*	2,6257
Приведенный расход воздуха через КНД $G_{пр I}$, кг/с	7,4174
Адиабатический КПД КНД $\eta_{ад I}^*$	0,9052
Степень двухконтурности m	8,76
Количество ступеней в бустере K_6	4

Схема препарирования модели С179-2 для исследования ее аэродинамических характеристик приведена на рис. 1. Для получения напорных веток во внешнем контуре вентилятора был установлен лопаточный дроссель. Для акустических испытаний вместо дросселя на выходе наружного контура устанавливалось номинальное сопло диаметром 689 мм. Кроме того, из проточной части внешнего контура удалялись все измерительные приборы, загромаздяющие проточную часть. **Трехрядные НРУ.** Конструкция испытанных НРУ представляла собой совокупность трех рядов щелей, при этом число щелей в каждом ряду было выбрано

довольно большим, что обеспечило отношение ширины щели к шагу решетки $\delta_s/t_s = 0,55...0,82$. Выбор такой конструкции обусловлен результатами аэродинамических расчетов, проведенных по полуэмпирической методике [24].

В описываемой серии экспериментов были использованы три конфигурации трехрядного надроторного устройства: в НРУ № 1 оси щелей каждого ряда лежат на одной линии, в НРУ № 2 оси щелевых отверстий первого ряда совпадают с осями щелей второго ряда, а в НРУ № 3 – третьего ряда (рис. 2).

В данной серии экспериментов надроторное устройство устанавливалось над рабочим колесом вентилятора, как показано на рис. 3 и рис. 4.

Порядок проведения испытаний. На выходе из внешней и внутренней проточной части модели установлены дроссели, управление которыми осуществляется из пультового стенда. Режим работы модели определяется тремя независимыми параметрами:

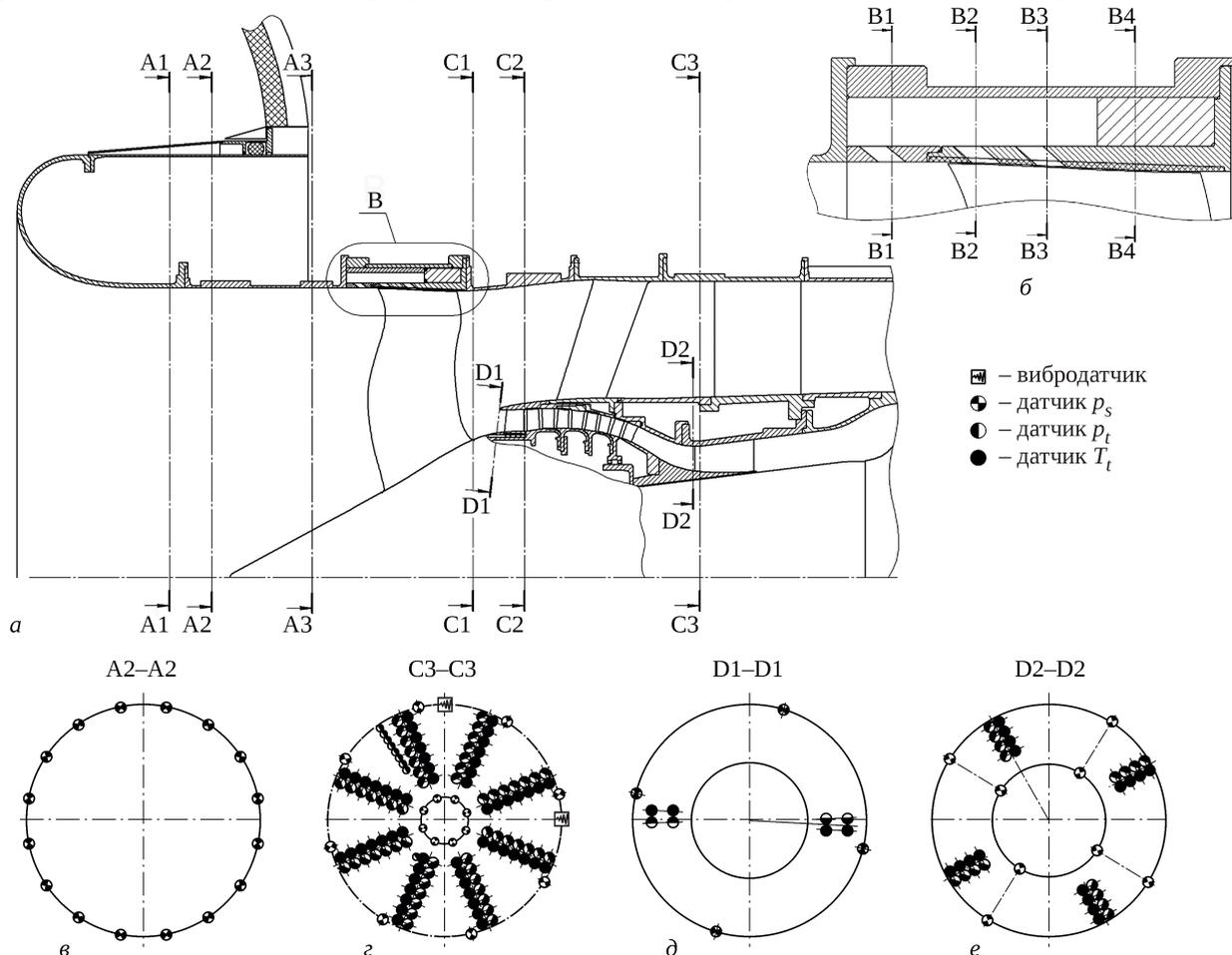


Рис. 1. Схема модели С179-2 (а) с надроторным устройством (б) и лопаточным дросселем во внешнем контуре и препарированные сечения на входе и выходе внешнего и внутреннего контуров модели: в – 16 датчиков статического давления (p_s); г – 16 датчиков p_s (по восемь в наружной и внутренней проточной части), восемь гребенок с датчиками полного давления и температуры ($8 \times (7p_t + 7T_t)$), гребенка с восемью датчиками p_t пограничного слоя, два вибродатчика; д – две гребенки датчиков p_t и T_t ($2 \times (2p_t + 2T_t)$), смонтированные на входном направляющем аппарате, четыре датчика p_s ; е – восемь датчиков p_s , четыре гребенки датчиков p_t и T_t ($4 \times (4p_t + 4T_t)$)

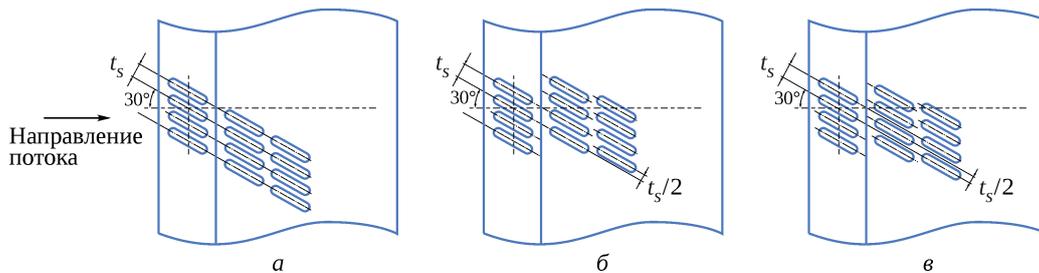


Рис. 2. Относительное расположение щелей в трех конфигурациях НРУ:
а – НРУ № 1; б – НРУ № 2; в – НРУ № 3

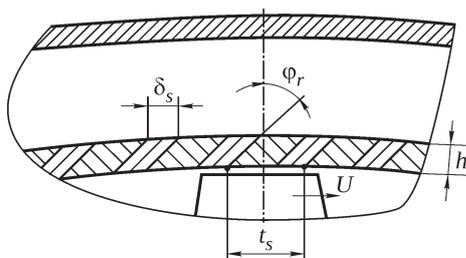


Рис. 3. Схема фрагмента корпуса вентилятора с установленным над рабочим колесом НРУ

- частотой вращения рабочего колеса;
- положением дросселя внутреннего контура;
- положением дросселя внешнего контура.

В процессе аэродинамических испытаний напорные характеристики внешнего контура получены в диапазоне приведенной частоты вращения ротора 58...100%.

Как показал опыт испытаний биротативных вентиляторов с широкохордными лопатками, режимы работы вентилятора ограничены не потерей ГДУ, а достижением максимально допустимых динамических напряжений на лопатках второго рабочего колеса. Поэтому крайние левые точки напорных веток исследуемого вентилятора, полученные в результате настоящих испытаний, соответствуют не потере ГДУ, а максимально допустимым динамическим напряжениям в лопатках. Эти напряжения определялись косвенно, с помощью системы бесконтактного измерения амплитуды колебаний концевых сечений рабочих лопаток вентилятора «МІС ДФМ». Критическим считался режим, когда размах



Рис. 4. Фото конфигурации НРУ № 3

колебаний концевых сечений рабочих лопаток ротора достигал 3,5 мм.

Акустические испытания проводились с номинальным соплом во внешнем контуре при частоте вращения ротора, соответствующей режимам захода на посадку, набора высоты и взлета, а также на некоторых промежуточных режимах.

Во всех контрольных точках с помощью дросселя внутреннего контура устанавливалась заданная (расчетная) степень двухконтурности объекта испытаний для соответствующей частоты вращения ротора.

Аэродинамические характеристики модели вентилятора С179-2 с усовершенствованными трехрядными НРУ

Напорные ветки внешнего контура модели С179-2 с комбинированным надроторным устройством в трех конфигурациях получены при пяти значениях приведе-

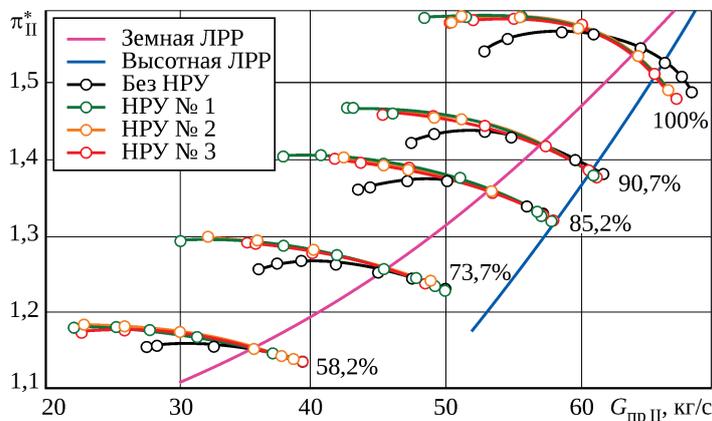


Рис. 5. Напорные ветки вентилятора С179-2

ной частоты вращения ротора: $\bar{n}_{пр} = 58,2; 73,7; 85,2; 90,7$ и 100% (рис. 5). Крайние левые точки напорных веток соответствуют предельно допустимым динамическим напряжениям на лопатках рабочего колеса. Все исследованные надроторные устройства обеспечивают увеличение степени повышения полного давления в левой ветке и рост запаса устойчивой работы вентилятора на всех режимах (ЛРР – линия рабочих режимов).

График зависимости адиабатического КПД внешнего контура от приведенного расхода воздуха (рис. 6) свидетельствует об устойчивом повышении КПД вен-

тилятора с НРУ № 3 на всех режимах, запас устойчивой работы вентилятора при этом не снижается. На расчетном режиме это НРУ обеспечивает увеличение максимального значения $\eta_{ад II}^*$ на $0,6\%$, а рост запаса устойчивой работы вентилятора составляет $9,2\%$.

Экспериментально получены границы устойчивой работы вентилятора С179-2 с НРУ и в исходной конфигурации (рис. 7). Все исследованные в настоящей серии испытаний надроторные устройства обеспечивают стабильное увеличение запаса устойчивости на всех режимах. Наиболее эффективное НРУ № 1 обеспечивает уве-

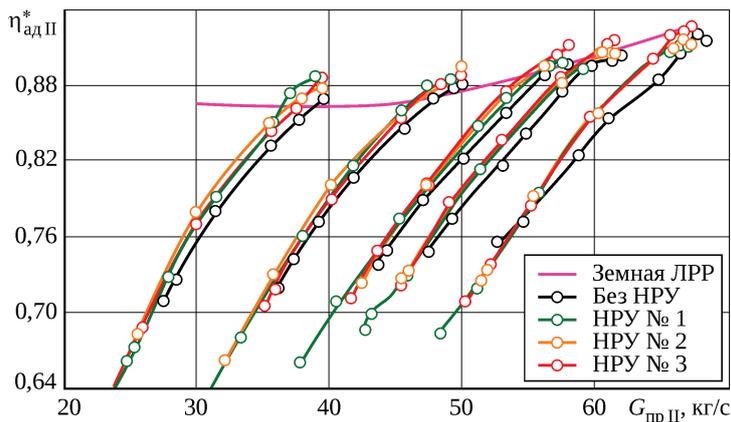


Рис. 6. Адиабатический КПД вентилятора С179-2

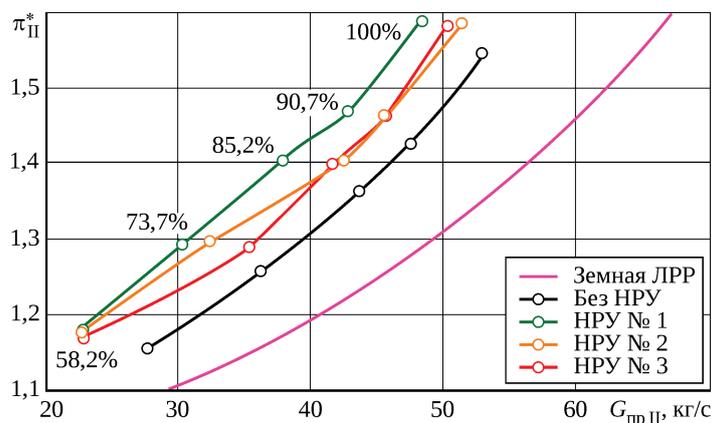


Рис. 7. Границы устойчивой работы вентилятора С179-2

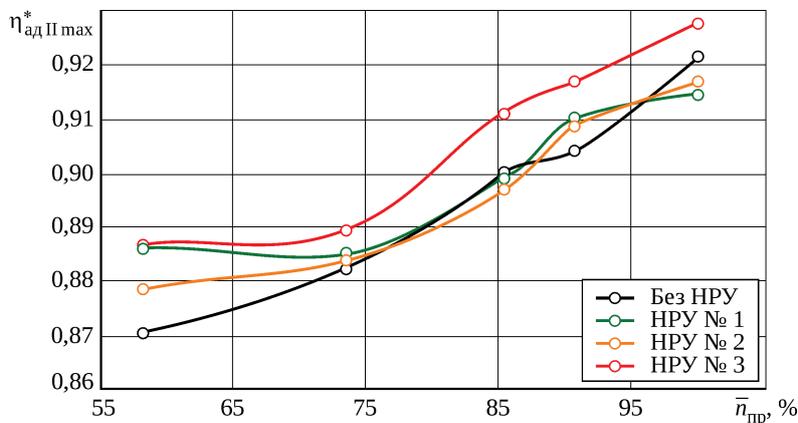


Рис. 8. Максимальные значения адиабатического КПД вентилятора С179-2

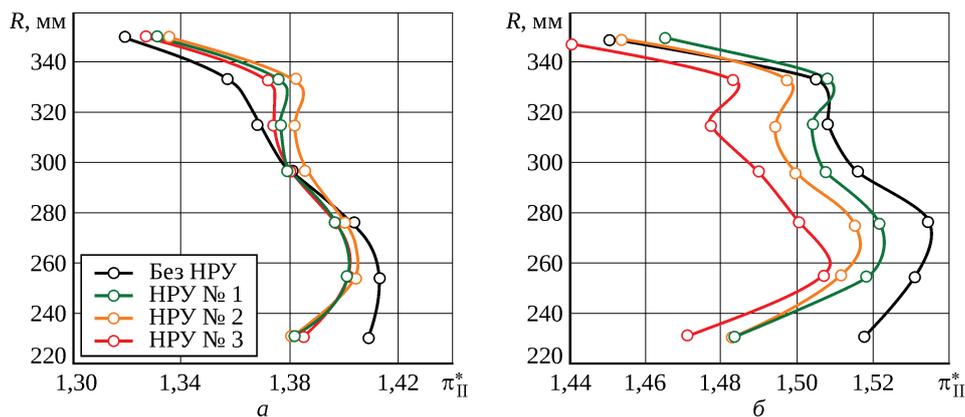


Рис. 9. Эпюры степени повышения полного давления на выходе вентилятора С179-2:
 $a - \bar{\eta}_{\text{пр}} = 90,7\%$; $b - \bar{\eta}_{\text{пр}} = 100\%$

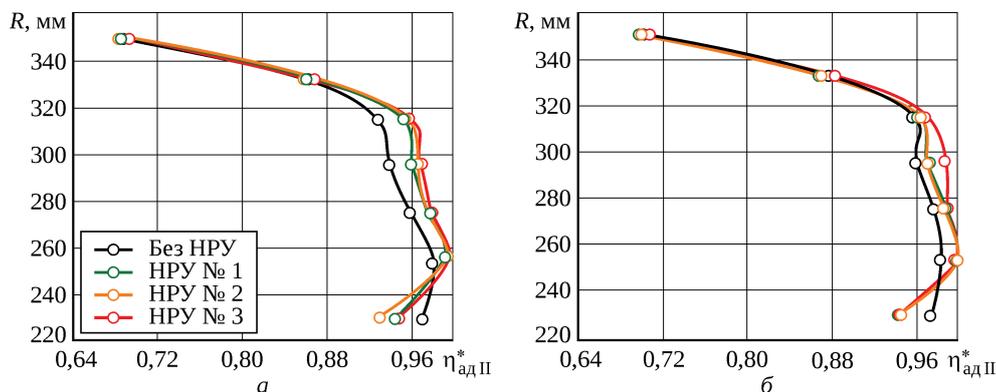


Рис. 10. Эпюры адиабатического КПД на выходе вентилятора С179-2:
 $a - \bar{\eta}_{\text{пр}} = 90,7\%$; $b - \bar{\eta}_{\text{пр}} = 100\%$

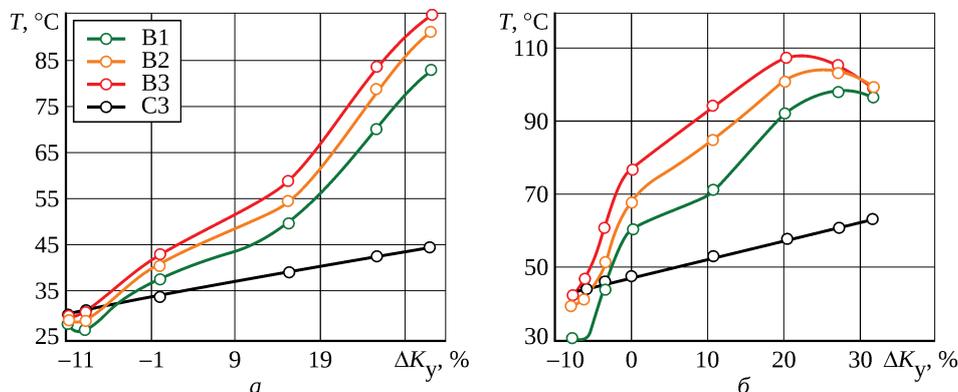


Рис. 11. Зависимости температуры в препарированных сечениях полости НРУ № 3 от степени дросселирования вентилятора:
 $a - \bar{\eta}_{\text{пр}} = 85,2\%$; $b - \bar{\eta}_{\text{пр}} = 100\%$

личение запаса устойчивой работы вентилятора на низких режимах ($\bar{\eta}_{\text{пр}} = 58 \dots 74\%$) на 28...34%, на средних режимах ($\bar{\eta}_{\text{пр}} = 85 \dots 92\%$) – на 18...23% и на расчетном режиме ($\bar{\eta}_{\text{пр}} = 100\%$) – на 15%. Наилучшее по КПД надроторное устройство НРУ № 3 обеспечивает несколько меньшее, но очень стабильное повышение запаса устойчивости на 6,4...9,2% в диапазоне частоты вращения ротора $73 < \bar{\eta}_{\text{пр}} < 100\%$ и на 30,2% при $\bar{\eta}_{\text{пр}} = 58,2\%$ (на расчетном режиме, как было сказано выше, запас устойчивости возрастает на 9,2%).

В сравнении с другими надроторными устройствами НРУ № 3 обеспечивает стабильное повышение максимального значения адиабатического КПД вентилятора во всем диапазоне частоты вращения ротора ($58,2 < \bar{\eta}_{\text{пр}} < 100\%$) на 0,6...1,6%, причем на расчетном режиме оно составляет 0,6%, а на режиме взлета ($\bar{\eta}_{\text{пр}} = 90,7\%$) – 1,3% (рис. 8).

На рис. 9 приведены эпюры степени повышения полного давления на выходе вентилятора на режимах $\bar{\eta}_{\text{пр}} = 90,7\%$ и $\bar{\eta}_{\text{пр}} = 100\%$ в точках напорных веток, соот-

ветствующих максимальному значению адиабатического КПД вентилятора. Эпюра для НРУ № 1 существенно смещена вправо относительно двух других по всей высоте проточной части вентилятора, что говорит о смещении точки максимального КПД вентилятора с этим НРУ вдоль напорной ветки влево (в сторону более высокой степени повышения полного давления).

Эпюры адиабатического КПД на выходе вентилятора для тех же режимов и точек напорных характеристик (рис. 10) свидетельствуют о том, что НРУ № 3 обеспечивает наилучший КПД как в ядре потока, так и в крайних точках (у границ потока).

На рис. 11 приведены зависимости температуры в препарированных сечениях полости НРУ № 3 (В1, В2 и В3) в соответствии с их расположением на рис. 1 от степени дросселирования вентилятора (т.е. от положения точки на напорной ветке) при частотах вращения $\bar{n}_{пр} = 85,2\%$ и $\bar{n}_{пр} = 100\%$. На графики нанесены также линии средней полной температуры на выходе вентилятора (в сечении С3). Температура потока в полости НРУ значительно превышает полную температуру потока на выходе вентилятора и растет в положительном продольном направлении.

Акустические характеристики модели вентилятора С179-2 с усовершенствованными трехрядными НРУ

Стенд и измерительное оборудование. Заглушенная камера акустического стенда Ц-3А ЦИАМ представляет собой прямоугольное помещение объемом 1150 м³ со следующими линейными размерами: высотой 5,0 м, длиной 15,6 м и шириной 14,7 м (рис. 12,а; ПТУ – про-

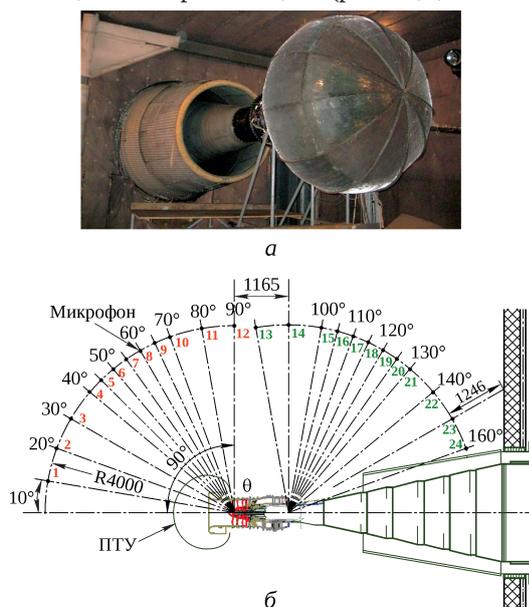


Рис. 12. Фото заглушенной камеры стенда ЦИАМ (а) и схема расположения микрофонов (б)

тивотурбулентное устройство). Стены камеры облицованы пористым звукопоглощающим материалом – частично винипором и периотексом. К достоинствам стенда можно отнести возможность одновременного измерения шума вентилятора в передней и задней полусферах. Для этого был разработан уникальный валопровод, который позволил разместить модель вентилятора на расстоянии от задней стенки, равном десяти диаметрам вентилятора.

Система сбора и обработки акустической информации на стенде включает 24 акустических канала, каждый из которых содержит микрофон типа 4939 (диаметром 1/4 дюйма), предварительный усилитель типа 2670, кабель АО 0416 (2 × 30 м) и четырехканальный усилитель NEXUS 2690 (все элементы – фирмы Bruel & Kjaer). Во время проведения испытаний все микрофоны снабжены противовеетровыми экранами типа UA 0459 фирмы Bruel & Kjaer.

Микрофоны установлены на направлениях от $\theta = 10^\circ$ до $\theta = 160^\circ$ через $5 \dots 10^\circ$ на двух дугах радиусом 4,0 м относительно передней кромки первого ротора и среза сопла в соответствии со схемой, изображенной на рис. 12,б.

Измерительные каналы подключены к двум многоканальным регистраторам-анализаторам MIC-300 фирмы «Мера», скомпонованным на базе персональных компьютеров. Многоканальная система регистрации и анализа сигналов от микрофонов строится на базе плат PCI M-2428. Рабочий диапазон частот $0 \dots 100$ кГц.

Программное обеспечение позволяет выполнять третьоктавный и узкополосный анализ (максимальное число линий 8192). Программное обеспечение позволяет формировать выходную информацию в формате ASCII. Аппаратно-анализирующий комплекс удовлетворяет действующим стандартам ISO, распространяющимся на регистрирующую и анализирующую акустическую аппаратуру.

Результаты измерений. Модель одноступенчатого вентилятора С179-2 испытывалась на режимах, приведенных в табл. 1. В качестве критерия оценки акустической эффективности НРУ используется суммарное снижение уровня звуковой мощности (ΔP_{WL}) вентилятора на режимах взлета, набора высоты и посадки.

Табл. 1. Режимные параметры модели вентилятора С179-2

Режим	$n_{пр}$, об/мин	$\bar{n}_{пр}$, %	t
58% Ном	6137	58,2	9,32
68% Ном	7173	68,0	9,28
73,7% Ном	7774	73,7	9,23
82% Ном	8277	82,0	9,17
Набор высоты	8987	85,2	9,16
Взлет	9735	92,3	8,83

На рис. 13 приведены третьоктавные спектры звуковой мощности модели вентилятора на взлетном режиме. Наибольшее изменение уровней шума происходит в третьоктавах с центральными частотами 1,25; 1,6 и 2,0 кГц. В этом диапазоне частот преобладает шум ударных волн [22; 23; 25], уровни которого снижаются на 4...10 дБ при установке НРУ. Ударные волны распространяются в основном в переднюю полусферу, следовательно, снижение уровня звукового давления (SPL)

в задней полусфере в третьоктаве с частотой 1,6 кГц, в которой отсутствуют тональные составляющие, говорит о воздействии НРУ на уровень широкополосной составляющей шума вентилятора (рис. 14).

На режиме «набор высоты» наличие НРУ приводит к снижению уровня звуковой мощности в третьоктавах, содержащих тон на частоте следования лопаток вентилятора (BPF1 = 2,67 кГц) и ее первой гармоники (BPF2 = 5,33 кГц), в среднем на 1...2 дБ.

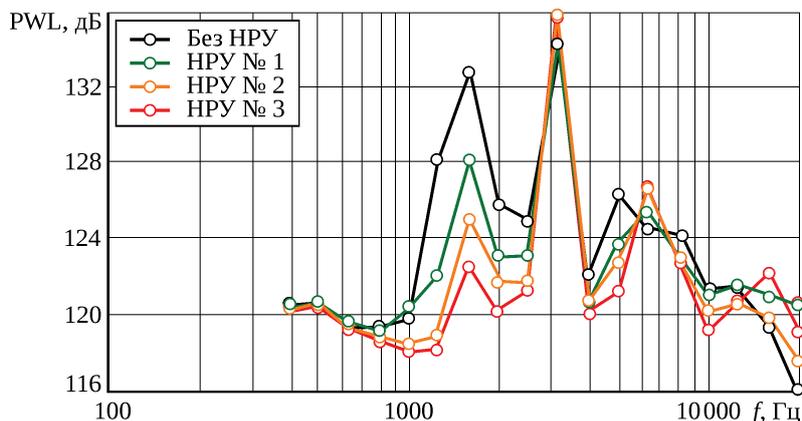


Рис. 13. Третьоктавные спектры звуковой мощности модели вентилятора С179-2 на режиме «взлет» (92,3% Ном)

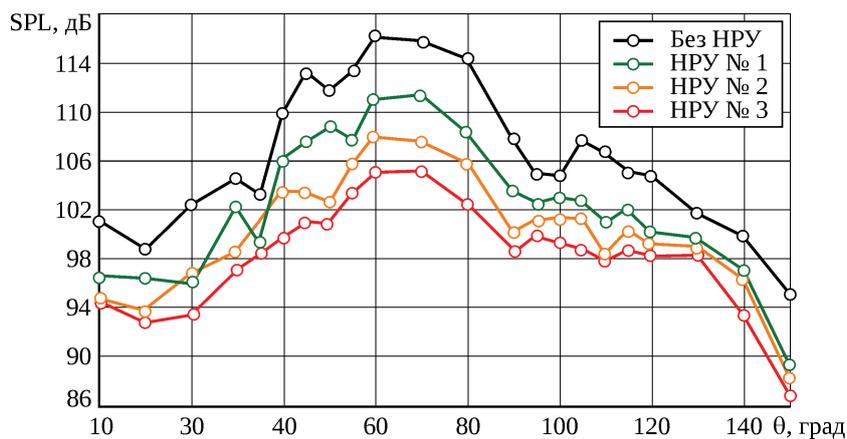


Рис. 14. Диаграммы направленности шума в третьоктаве 1,6 кГц на режиме «взлет» (92,3% Ном)

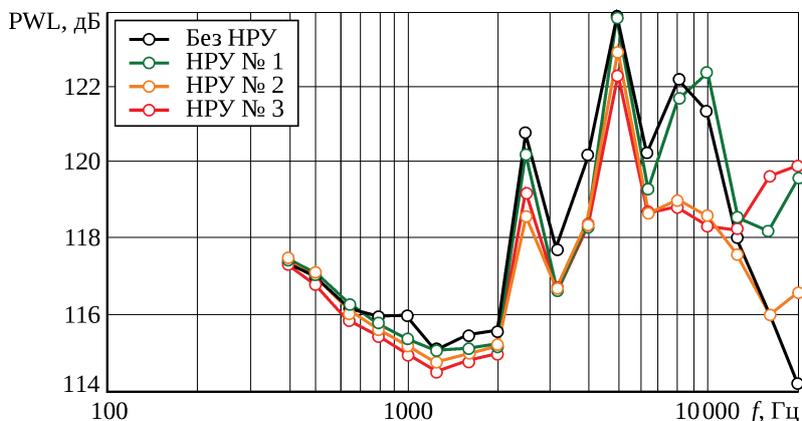


Рис. 15. Третьоктавные спектры звуковой мощности модели вентилятора С179-2 на режиме «набор высоты» (85,2% Ном), $U_B = 326$ м/с (BPF1 = 2666 Гц)

На рис. 15 можно отметить повышение уровня звуковой мощности в третьоктавах с частотами 16,0 и 20,0 кГц, что является результатом усиления гармоник с высоким номером тона на частоте следования, а именно ВРФ6, ВРФ7 и ВРФ8.

Наибольшая эффективность НРУ № 3 и НРУ № 2 как глушителей шума проявляется на второй и третьей гармониках тонального шума на частоте следования (ВРФ3 = 8,0 кГц; ВРФ4 = 10,66 кГц), снижение шума на

этих частотах наблюдается в направлениях излучения 70...160° и составляет 4...6 дБ (рис. 16).

На режиме «посадка» установка НРУ приводит к снижению уровня звуковой мощности примерно на 2 дБ в частотном диапазоне 400 Гц – 12,5 кГц (рис. 17). На рис. 18 приведены диаграммы направленности тонального шума вентилятора на частоте следования 1600 Гц и ее первой гармоники 3150 Гц. Снижение шума в высокочастотной области в районе 8 и 10 кГц

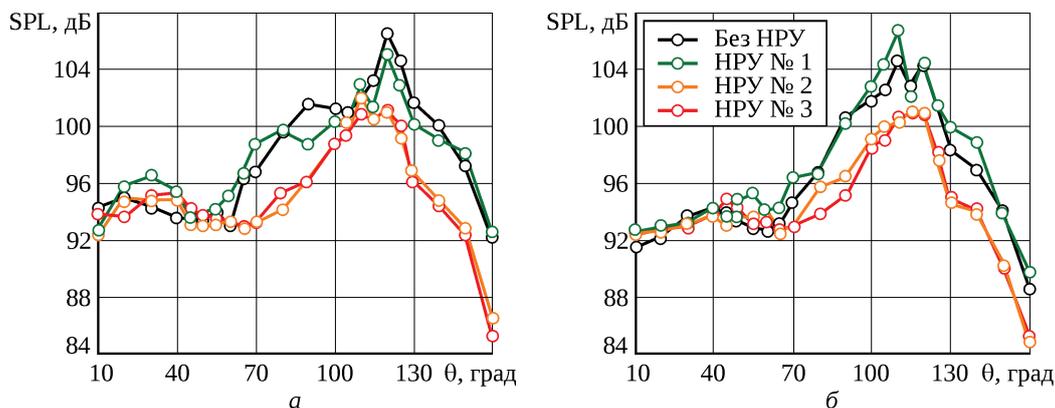


Рис. 16. Диаграммы направленности тонального шума на режиме «набор высоты» (85,2% Ном): а – в третьоктаве 8,0 кГц (ВРФ3); б – в третьоктаве 10,0 кГц (ВРФ4)

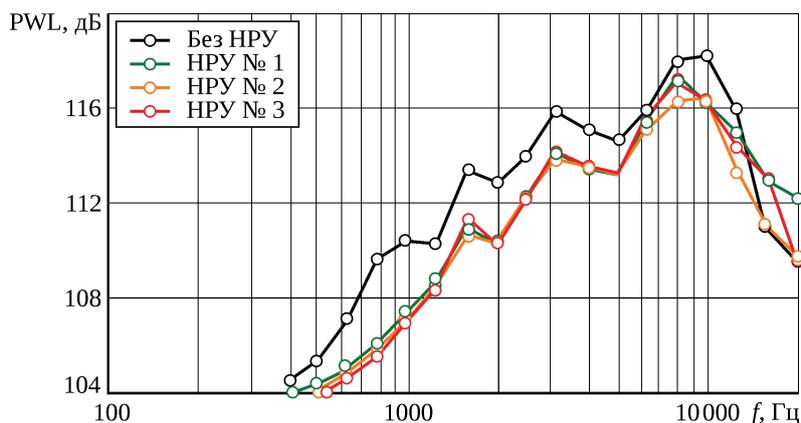


Рис. 17. Третьоктавные спектры звуковой мощности модели вентилятора С179-2 на режиме «посадка» (55,0% Ном)

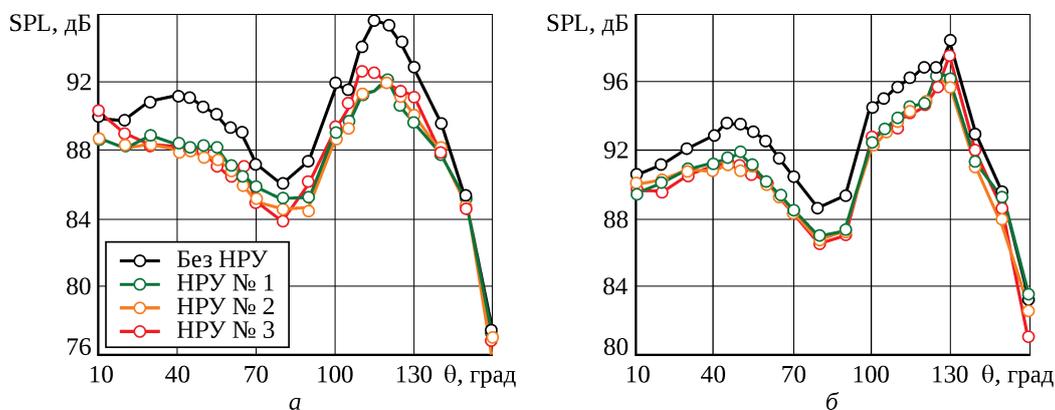


Рис. 18. Диаграммы направленности тонального шума вентилятора на режиме «посадка» (55,0% Ном): а – в третьоктаве 1,6 кГц (ВРФ1); б – в третьоктаве 3,15 кГц (ВРФ2)

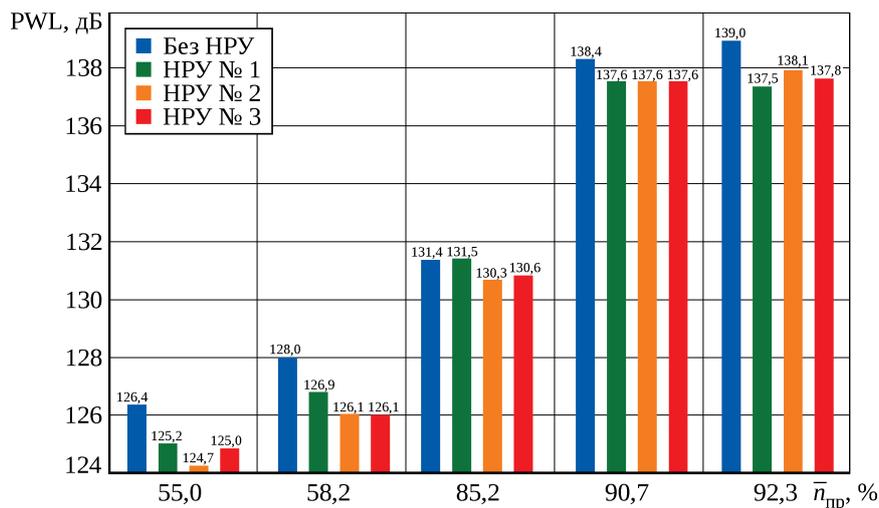


Рис. 19. Сравнение суммарных уровней звуковой мощности модели вентилятора С179-2 при разной частоте вращения ротора

Табл. 2. Эффективность снижения уровня акустической мощности (дБ) модели вентиляторной ступени С179-2 при установке трехрядного НРУ

НРУ	Режим работы					Суммарно по трем сертификационным режимам
	55,0% Посадка	58,2%	85,2% Набор высоты	90,7%	92,3% Взлет	
№ 1	1,2	1,1	-0,1	0,8	1,5	2,6
№ 2	1,7	1,9	1,1	0,8	0,9	3,7
№ 3	1,4	1,9	0,8	0,8	1,2	3,4

обусловлено затуханием шума комбинационных тонов ВРФ1 + Fb и ВРФ2 + Fb, где Fb – частота следования лопаток первой подпорной (бустерной) ступени.

Представленные гистограммы суммарных уровней звуковой мощности (рис. 19) отражают интегральную оценку влияния НРУ на шум вентилятора. Все три конфигурации НРУ в той или иной степени приводят к снижению акустической мощности модели вентилятора на всех режимах работы. В сумме по трем основным режимам – «взлет», «набор высоты» и «посадка» – наиболее эффективными являются конфигурации НРУ № 3 и НРУ № 2, обеспечивающие снижение звуковой мощности на величину около 3,5 дБ (табл. 2).

Заключение

Для повышения запаса газодинамической устойчивости, КПД и снижения шума вентиляторов двухконтурных двигателей были спроектированы и изготовлены три модификации надроторного устройства для модели однорядного вентилятора С179-2. Проведены комплексные экспериментальные исследования модели С179-2.

Получены следующие результаты:

- все исследованные модификации НРУ обеспечивают увеличение степени повышения давления в левой ветке характеристики и увеличение запаса устойчивой работы вентилятора на всех режимах ($\bar{n}_{np} = 58...100\%$);
- НРУ № 1 обеспечивает увеличение запасов устойчивой работы вентилятора на низких режимах ($\bar{n}_{np} = 58...74\%$) на 28...34%, на средних режимах ($\bar{n}_{np} = 85...92\%$) – на 18...23% и на расчетном режиме ($\bar{n}_{np} = 100\%$) – на 15%;
- НРУ № 3 обеспечивает одновременное повышение КПД и увеличение запаса устойчивой работы вентилятора на всех режимах. Максимальные значения КПД увеличиваются на 0,6...1,6%, запас устойчивости – на 6,4...9,2% в диапазоне частот вращения ротора $73 < \bar{n}_{np} < 100\%$ и на 30,2% при $\bar{n}_{np} = 58,2\%$;
- НРУ № 3 обеспечивает наилучший КПД в ядре потока.
- наибольшую акустическую эффективность показали НРУ № 3 и НРУ № 2, обеспечившие суммарное снижение звуковой мощности по трем основным режимам работы вентилятора – взлету, набору высоты и посадке – на ~ 3,5 дБ.

Литература / Reference

1. Anti-stall tip treatment means : United States patent 5,762,470 / F.S. Gelmedov, E.A. Lokshtanov, L.E.-M. Olstain, M.A. Sidorkin ; assignee Central Institute of Aviation Motors. Date of patent 09.06.1998 ; appl. No. 513,903 ; PCT filed 11.03.1994 ; PCT No. PCT/GB94/00481 ; PCT publ. No. WO94/20759 ; PCT publ. date 15.09.1994. 6 p.
2. Anti-stall tip treatment means : European patent specification EP 0688400 B1 / Gelmedov F.S., Lokshtanov E.A., Olshtein L.E.-M., Sidorkin M.A. ; proprietor Central Institute of Aviation Motors. Date of publ. and mention of the grant of the patent 23.04.1997, Bull. 1997/17 ; appl. nr 94909187.0 ; date of filing 11.03.1994 ; priority 11.03.1993, SU 9312990 ; date of publ. of appl. 27.12.1995, Bull. 1995/52 ; intern. appl. nr PCT/GB94/00481 ; intern. publ. nr WO 94/20759 (15.09.1994, Gazette 1994/21). 7 p.
3. Mileshe V.I. Numerical and experimental investigation of bypass fan stage models and high loaded compressor stages for development of new fan and high pressure compressor for advanced engines : key-note speech at 10th European Turbomachinery Conference ETC10, April 15–19, 2013, Lappeenranta, Finland. 2013.
4. Mileshe V.I. Challenges in fan and high pressure compressor development : key-note speech at XXI International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE 2013), September 9–13, 2013, Busan, Korea. 2013.
5. Mileshe V.I., Brailko I.A., Startsev A.N. Application of casing circumferential grooves to counteract the influence of tip clearance // ASME Turbo Expo 2008 : Power for Land, Sea, and Air, June 9–13, 2008, Berlin, Germany. Vol. 6: Turbomachinery, pt. A/C. P. 617–627. GT2008-51147.
6. The momentum balance in the blade tip region and the effectiveness of circumferential grooves in a transonic rotor / Xi Nan, Feng Lin, Juan Du, Jingyi Chen. 2013. (ASME Turbo Expo 2013, June 3–7, San Antonio, USA ; GT2013-95372).
7. Hembera M., Kau H.-P., Johann E. Simulation of casing treatments of a transonic compressor stage // International Journal of Rotating Machinery. 2008. Article ID 657202. 10 p.
8. Wilke I., Kau H.-P. Stall margin enhancing flow mechanisms in a transonic compressor stage with axial casing slots. 2004. (10th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery ; 10-2004-006).
9. An advanced axial-slot casing treatment on a tip-critical transonic compressor rotor. Part 1: Unsteady hot wire and wall pressure measurements / C. Brandstetter, F. Wartzek, H.-P. Schiffer, J.A. Streit, F. Heinichen // 10th European Turbomachinery Conference on Turbomachinery : Fluid Dynamics and Thermodynamics : conference proceedings / ed.: J. Backman, G. Bois and O. Leonard. Lappeenranta, Finland : Lappeenranta University of Technology, 2013. P. 72–82. Paper A070.
10. An advanced axial-slot casing treatment on a tip-critical transonic compressor rotor. Part 2: Taking a closer look with CFD / J.A. Streit, H.-P. Kau, C. Brandstetter, F. Heinichen // 10th European Turbomachinery Conference on Turbomachinery : Fluid Dynamics and Thermodynamics : conference proceedings / ed.: J. Backman, G. Bois and O. Leonard. Lappeenranta, Finland : Lappeenranta University of Technology, 2013. P. 83–93. Paper A068.
11. Hah Ch., Mueller M., Schiffer H.-P. Study on convective flow effects in endwall casing treatments in transonic compressor rotors // ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. Vol. 8: Turbomachinery, pt. A/C. P. 95–106. GT2012-68411.
12. A CFD study of circumferential groove casing treatments in a transonic axial compressor / H. Chen, X. Huang, K. Shi, S. Fu, M.A. Bennington, S.C. Morris, M. Ross, S. McNulty, A. Wadia // ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, June 14–18, 2010, Glasgow, UK. Vol. 7: Turbomachinery, pt. A/C. P. 513–523. GT2010-23606.
13. Numerical simulation of compressor endwall and casing treatment flow phenomena / A.J. Crook, E.M. Greitzer, C.S. Tan, J.J. Adamczyk // Journal of Turbomachinery. 1993. Vol. 115, iss. 3. P. 501–512.
14. Fujita H., Takata H. A study of configurations of casing treatment for axial flow compressors // Bulletin of JSME. 1984. Vol. 27, No. 230. P. 1675–1681.
15. Hah C., Rabe D.C., Wadia A.R. Role of tip-leakage vortices and passage shock in stall inception in a swept transonic compressor rotor // ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, June 14–17, 2004, Vienna, Austria. Vol. 5, pt A/B. P. 545–555. GT2004-53867.
16. Khaletskii Iu.D., Mileshe V.I. Experimental study of casing treatment impact on ducted counter-rotating fan noise // 22nd International Congress on Acoustics (ICA 2016), Buenos Aires, Argentina, 5–9 September 2016. Curran Associates, 2016. Vol. 6. P. 4312–4321. ICA2016-0108.

-
17. Influence of the casing treatment design parameters on the ducted counter rotating fan noise / Khaletskii Iu., Pochkin Ya., Korznev V., Mileschin V. // 24th International Congress on Sound and Vibration 2017 (ICSV 24), London, United Kingdom, 23–27 July 2017. Curran Associates, 2017. Vol. 2. P. 1150–1157.
 18. Mileschin V.I. A review of new experimental technologies for the development of advanced fans with high bypass ratio // International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power. 2018. Vol. 3, iss. 3. Art. 21. 32 p. DOI 10.3390/ijtp3030021.
 19. Talbotec J., Vernet M. Snecma counter rotating turbo fan aerodynamic design logic & tests results // 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2010 (ICAS 2010), Nice, France, 19–24 September 2010. Curran Associates, 2010. Vol. 4. P. 2550–2559. ICAS 2010-087.
 20. Cailleau J.-M. CRTF fan aerodynamic & acoustic design & concept improvement – preliminary results. 2009. (VITAL Workshop, Budapest, Hungary, 9–10 March, 2009).
 21. Study on noise of counter rotating fan models at CIAM anechoic chamber / Khaletskiy Yu., Mileschin V., Talbotec J., Nicke E. // 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2012 (ICAS 2012), Brisbane, Australia, 23–28 September 2012. Curran Associates, 2013. Vol. 2. P. 1325–1334. ICAS 2012-897.
 22. Pankov S.V., Mileschin V.I., Orekhov I.K. Numerical and experimental investigations of single-flow and bypass-flow fans. 2012. (FAN 2012, Senlis (France), 18–20 April 2012 ; FAN 2012-39).
 23. Pankov S.V., Mileschin V.I., Korzhnev V.N. Numerical and experimental investigations bypass-flow fans for an advanced civil aircraft engine // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014), St. Petersburg, Russia, 7–12 September 2014. Curran Associates, 2014. Vol. 3. P. 2634–2642. ICAS 2014-0104.
 24. Stall margin improvement in three-stage low pressure compressor by use of slot type casing treatments / F.Sh. Gelmedov, V.I. Mileschin, P.G. Kozhemyako, I.K. Orekhov // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany. Vol. 2A: Turbomachinery. GT2014-26298. 11 p.
 25. Коржнев В.Н., Милешин В.И., Панков С.В. Расчетно-экспериментальные исследования аэродинамики вентиляторов перспективных ТРДД // Ученые записки ЦАГИ. 2019. Т. 50, № 3. С. 3–18.
Korzhev V.N., Mileschin V.I., Pankov S.V. Raschetno-eksperimental'nye issledovaniia aerodinamiki ventilatorov perspektivnykh TRDD [Computational and experimental studies of aerodynamics of fans for advanced turbofan engines]. TsAGI Science Journal. 2019. Vol. 50. No 3. P. 3–18.

Материалы получены редакцией 05.02.2021