

DOI: 10.15593/2224-9982/2021.66.03

УДК 621.452.322: 621.51

**Я.М. Дружинин, В.И. Милешин, А.А. Россихин**

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

## **РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНАЛЬНОГО ШУМА ВЕНТИЛЯТОРА С НАДРОТОРНЫМ УСТРОЙСТВОМ**

Представлено расчетное исследование влияния щелевого НРУ на акустические и аэродинамические характеристики вентилятора со сверхвысокой степенью двухконтурности, выполненное с использованием программного комплекса NUMECA FINE/Turbo. Для того чтобы описать воздействие НРУ на нестационарное поле течения в турбомашине, использовался гармонический NLH-метод расчета. Исследование было проведено для двух режимов работы вентилятора – взлет и посадка. На первом режиме основное внимание было уделено аэродинамическим характеристикам. Было показано, что установка НРУ существенно влияет на эти характеристики. Особенно сильно это влияние проявляется вблизи границы устойчивой работы. На режиме «посадка» основное внимание было уделено расчету тонального шума. Было показано, что наличие НРУ приводит к снижению мощности тонального шума, излучаемого через воздухозаборник, при росте мощности шума, излучаемого через сопло, и суммарной мощности шума.

**Ключевые слова:** вентилятор, ТРДД, надроторное устройство, тональный шум, численные методы.

**Y.M. Druzhinin, V.I. Mileshin, A.A. Rossikhin**

Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow, Russian Federation

## **NUMERICAL INVESTIGATION OF A TONE NOISE OF THE FAN WITH CASING TREATMENT**

Numerical investigation of influence of a slot-type casing treatment on acoustic and aerodynamic characteristics of the fan of ultra-high bypass ratio turbofan is presented. The investigation was performed using NUMECA FINE/Turbo solver. NLH harmonic method was used to simulate the effect of casing treatment on unsteady flow field in the turbomachine. Two operational conditions were investigated – “sideline” and “approach”. The attention for the first operational condition was paid for aerodynamic characteristics. Significant influence of casing treatment on them was found especially near the surge line. At the “approach” operational conditions the attention was paid for the proper calculation of tone noise. It was shown that the installation of casing treatment leads to decrease of power of tone noise radiated through the inlet. However the power of the tone noise, radiated through the nozzle, and also the overall power of tone noise increase.

**Keyword:** fan, turbofan, casing treatment, tone noise, numerical methods.

### **Введение**

Надроторные устройства (НРУ) используются для повышения запаса ГДУ вентиляторов и компрессоров. Основное внимание исследователей уделяется влиянию надроторных устройств на аэродинамические характеристики компрессора. Тем не менее в ряде экспериментальных исследований [1, 2] было показано, что надроторные устройства могут влиять и на акустические характеристики вентиляторов. В зависимости от выбора характеристик надроторного устройства возможно как улучшение акустических характеристик, так и их ухудшение [2].

В ЦИАМ была выполнена большая серия экспериментальных исследований, посвященных влиянию НРУ щелевого типа на акустические и аэродинамические характеристики однорядных и биротативных вентиляторов [3–5]. Результаты этих исследований показали, что как для биротативных, так и для однорядных вентиляторов можно подобрать такие щелевые НРУ, которые позволят улучшить акустические характеристики вентиляторов на режимах работы двигателя «взлет», «набор высоты» и «посадка» и в то же время не ухудшат аэродинамические характеристики вентиляторов на крейсерском режиме [5].

В данной работе представлено расчетное исследование влияния НРУ на тональный шум вентилятора с ультранизкой окружной скоростью вращения ротора. Разработанный в ЦИАМ вентилятор [6] является моделью высокоэффективного малозумного одноступенчатого вентилятора перспективного редуторного ТРДД гражданского применения со сверхвысокой степенью двухконтурности. Вентилятор имеет 18 лопаток в рабочем колесе и 47 лопаток в спрямляющем аппарате.

Использование НРУ может позволить увеличить запас ГДУ вентилятора, что является немаловажным для двигателей с такой степенью двухконтурности [7]. Кроме того, наличие НРУ может позволить дополнительно снизить шум вентилятора. НРУ щелевого типа, влияние которого на шум вентилятора исследовалось в рамках данной работы, было разработано в ЦИАМ на основании опыта предыдущих исследований. Устройство имело три ряда щелей по 152 щели в каждом.

Наиболее общим подходом к расчетному исследованию влияния НРУ на аэродинамические и акустические характеристики вентилятора является непосредственное решение численных уравнений для заданного числа шагов по времени (расчет во временной области) в расчетной области с угловыми размерами, равными полному пространственному периоду рассматриваемой системы. Обычно число лопаток в роторе и статоре и число щелей в НРУ не имеют общего делителя, отличного от единицы. Ввиду этого расчет приходится проводить в расчетной области с угловыми размерами, равными  $360^\circ$ . Такой расчет может дать наиболее полную информацию о характеристиках системы, но требует привлечения существенных вычислительных ресурсов. Также могут наблюдаться проблемы со сходимостью расчета.

В настоящий момент в качестве эффективного альтернативного подхода к расчету нестационарного поля течения в лопаточных машинах рассматривается использование гармонических методов (расчет в частотной области) [8–10]. В их рамках решение в лопаточном венце находится в виде набора полей гармоник в одном межлопаточном канале венца. Следует отметить, что в общем случае

речь идет не о гармониках в смысле компонентов поля течения, получающихся в результате разложения поля течения в венце в ряд Фурье по времени, а о таких компонентах поля течения, которые являются совокупностями возмущений, имеющих одинаковую частоту и фазовый сдвиг между границами межлопаточного канала венца. В некоторых работах такие компоненты называются гармоническими фрагментами [11]. Представление поля течения в виде набора гармоник позволяет перейти от задачи нахождения временной эволюции системы к задаче на установление. При этом, если учитывать в расчете только те гармоника, которые соответствуют наиболее сильным возмущениям, генерируемым в турбомашине, можно существенно сократить потребность в вычислительных ресурсах.

Если в рамках расчета НРУ можно разделить по окружности на  $N$  одинаковых секторов, то с точки зрения постановки расчета в частотной области его можно рассматривать как венец из  $N$  лопаток. Ввиду этого для расчета взаимодействия между НРУ и ротором можно использовать гармонические методы. Примеры использования гармонических методов для расчета влияния НРУ на аэродинамические характеристики вентиляторов можно найти в работе [12].

В данной работе исследование влияния НРУ на акустические и аэродинамические характеристики вентилятора проводится с использованием программного комплекса NUMECA FINE/Turbo [13] и реализованного в данном программном комплексе гармонического NLH-метода. Его описание можно найти в работе [14]. В рамках этого метода гармонические возмущения рассматриваются в линейной постановке, однако при расчете стационарной составляющей поля течения учитываются эффекты, связанные с нелинейным взаимодействием между ним и гармоническими возмущениями. Такой подход позволяет частично учитывать нелинейные эффекты, но в то же время избегать проблем с устойчивостью, характерных для метода балланса гармоник [9], в рамках которого все возмущения рассматриваются в нелинейной постановке. Реализации метода, пригодные для расчета многоступенчатых турбомашин, описаны в работе [15].

Статья имеет следующую структуру. В первом подразделе дано краткое описание вентилятора и НРУ. Во втором подразделе для режима «взлет» с использованием метода NLH исследуется влияние НРУ на аэродинамические характеристики вентилятора. В третьем подразделе описывается расчет аэродинамических характеристик вентилятора с использованием метода NLH. Исследуется воздействие НРУ на акустические характеристики вентилятора на режиме «посадка».

### Объект исследования

Объектом исследования является модель двухконтурного вентилятора с входным диаметром  $D_{вх} = 700$  мм (рис. 1). Бесполочные широкохордные рабочие лопатки имеют переменную по высоте стреловидность. Ступень вентилятора предназначена для испытаний в безэховой камере акустического стенда ЦИАМ. Вентилятор имеет сверхвысокую степень двухконтурности. Даже на расчетном режиме периферийная скорость вращения лопаток ротора является трансзвуковой. Рассматривается два варианта корпуса вентилятора: с гладкой проточной частью и с надроторным устройством щелевого типа со 152 щелями (рис. 2). Параметры вентилятора для расчетной точки, а также для режимов «посадка» и «взлет» приведены в табл. 1.



Рис. 1. Объект исследования – модель двухконтурного вентилятора

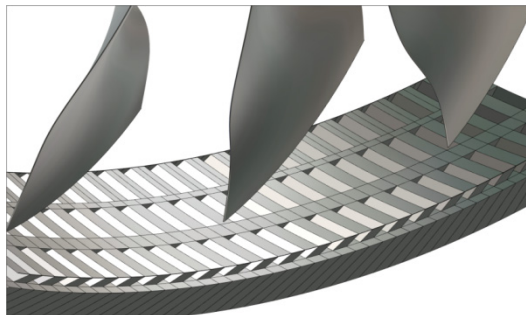


Рис. 2. Надроторное устройство щелевого типа с тремя поясами щелей

В данной работе будут исследоваться аэродинамические характеристики вентилятора с НРУ и без него на режиме «взлет» и акустические характеристики на режиме «посадка». Эти режимы наиболее подходят для демонстрации предложенной расчетной модели. Режим «взлет» выбран для исследования аэродинамических характеристик, поскольку для этого режима важно обеспечить хорошие аэродинамические характеристики вентилятора и значительный запас ГДУ. Для режима «посадка» обеспечение приемлемых акустических характеристик является наиболее важным вопросом. При этом для данного режима в силу меньшей частоты вращения вала требования к размеру расчетной сетки и числу рассматриваемых гармоник существенно ниже, чем для других акустических режимов.

НРУ представляет собой проставку с тремя поясами косых щелей в корпусе рабочего колеса, сообщающихся с притрактовой полостью. Первый пояс (считая от входа в вентилятор) расположен до передних кромок рабочего колеса, второй и третий пояса расположены в зоне перекрытия с проекцией хорды лопатки. Число щелей в каждом поясе одинаково и равно 152. Щели располагаются с равным шагом по окружности, при этом третий пояс сдвинут по окружности на  $\frac{1}{2}$  шага относительно второго пояса. Размеры щелей в каждом поясе одинаковы и составляют: длина  $\approx 26$  мм, ширина  $\approx 5$  мм. Размеры притрактовой полости: высота  $h = 18,5$  мм, осевая протяженность  $L = 94$  мм.

Таблица 1

Параметры модельного вентилятора

Параметр	Расчетная точка	Взлет	Посадка
Относительная скорость вращения вала, %	100	93	48
Окружная скорость вентилятора (приведенная), м/с	315	292,95	166,95
Суммарный расход (приведенный), кг/с	74,5	68,84	37,97
Степень двухконтурности	13,1	14	17

### Расчет стационарного и нестационарного полей течения в ступени с НРУ

Первый этап численного моделирования течения в вентиляторе состоит в расчете стационарных полей течения и интегральных характеристик для рассматриваемых режимов работы для ступени с гладкой проточной частью. Для их получения используется метод расчета, основанный на решении системы осредненных по Рейнольдсу 3D-уравнений Навье – Стокса (RANS), реализованный в программном комплексе NUMECA FINE/Turbo [13]. В качестве модели турбулентности используется двухпараметрическая модель турбулентной вязкости  $k-\epsilon$  [16]. Решения получены на основе конечно-разностной схемы Джемсона [17] в относительной системе отсчета.

Второй этап численного исследования состоит в расчете нестационарного течения в вентиляторе с НРУ с помощью нелинейного гармонического метода NLH. Для варианта с гладкой проточной частью в каждом из венцов рассматривались возмущения на первых четырех гармониках частоты следования лопаток другого венца. Для расчета поля течения в вентиляторе с НРУ с использованием базового NLH-метода число гармоник в статоре и в надроторном устройстве было также выбрано равным четырем. И в том и в другом случае рассматривались первые четыре гармоники частоты следования лопаток ротора. Число гармоник в роторе было равно восьми. Расчет в нем проводился для четырех гармоник частоты следования лопаток статора и четырех гармоник частоты следования щелей надроторного устройства.

Для выполнения расчетов построена конечно-объемная сетка с О–Н-топологией, охватывающая один межлопаточный канал

рабочего колеса и спрямляющего аппарата наружного контура вентилятора (рис. 3). Использовался автоматический сеточный генератор Numeca Autogrid 5. Суммарное число ячеек в межлопаточных каналах составляло 5 485 916. Размер пристенной ячейки подобран таким образом, что выполнялось условие на параметр  $y^+ \approx 1,0$ . Расчетная сетка в надроторном устройстве построена вручную в программе Numeca IGG. Сетка в НРУ охватывает один из 152 периодических элементов, включающих в себя по одной щели из каждого пояса и сектор ( $\approx 2,368^\circ$ ) притрактовой полости. Число ячеек в блоках НРУ составляло 1 944 424. Суммарное число ячеек в межлопаточных каналах и в НРУ составляло 7 430 340. Величина радиального зазора над рабочими лопатками задавалась 0,3 мм. Расчет выполнен при стандартных условиях на входе:  $P^* = 101\,325$  Па,  $T^* = 288,15$  К. В сечении выхода задавалось условие радиального равновесия, фиксировалось давление на периферии. Граничное условие на выходе из внутреннего контура установлено в виде заданного значения массового расхода воздуха.

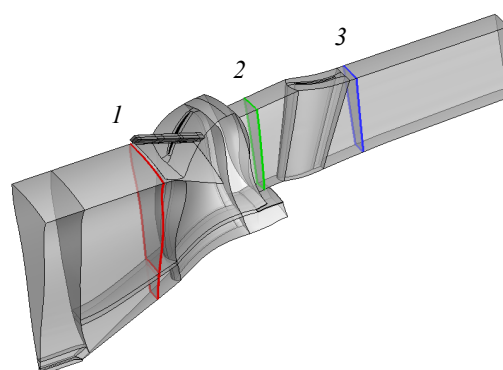


Рис. 3. Общий вид расчетной области. Цветными линиями показаны границы поверхностей, на которых проводился модальный анализ

С целью исследования влияния надротного устройства на аэродинамические характеристики были выполнены расчеты аэродинамических характеристик вентилятора для частоты вращения  $N = 93 \%$  (соответствует режиму «взлет»). Исследование было

выполнено с помощью базового NLH-метода. Интегральные характеристики в значениях степени повышения полного давления, массового расхода воздуха и адиабатического КПД для наружного контура представлены на рис. 4.

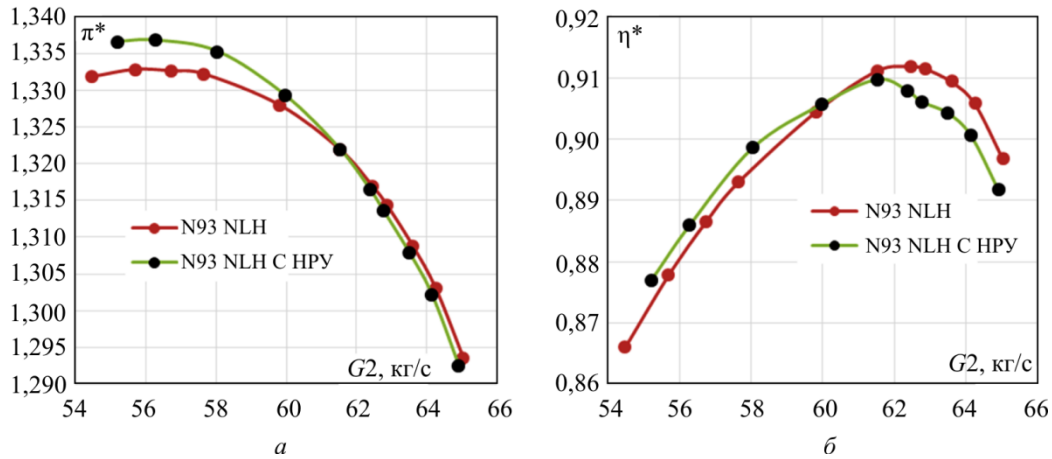


Рис. 4. Интегральные характеристики ступени с гладкой проточной частью и с НРУ:  $a$  – степень повышения полного давления;  $b$  – адиабатический КПД

Таблица 2

Интегральные характеристики ступени в точках на линии рабочих режимов (Л.Р.Р.) и вблизи границы газодинамической устойчивости, выбранных для анализа

Параметр	Без НРУ	С НРУ
Л.Р.Р.	$G2 = 64,25 \text{ кг/с}, \pi^* = 1,303, \eta^* = 0,906$	$G2 = 64,14 \text{ кг/с}, \pi^* = 1,302, \eta^* = 0,901$
Граница ГДУ	$G2 = 54,47 \text{ кг/с}, \pi^* = 1,332, \eta^* = 0,866$	$G2 = 55,20 \text{ кг/с}, \pi^* = 1,337, \eta^* = 0,877$

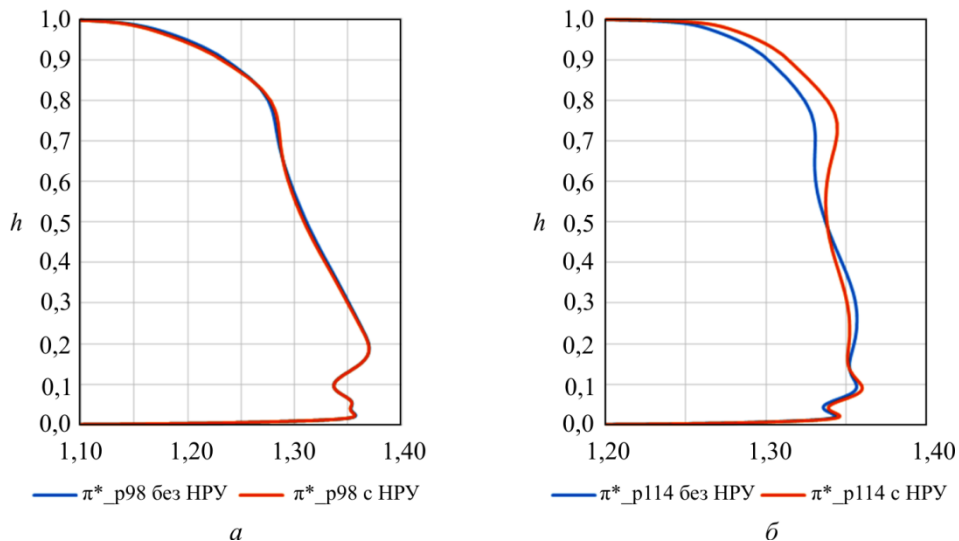


Рис. 5. Радиальное распределение степени повышения полного давления  $\pi^*$  за спрямляющим аппаратом:  $a$  – Л.Р.Р.;  $b$  – граница ГДУ

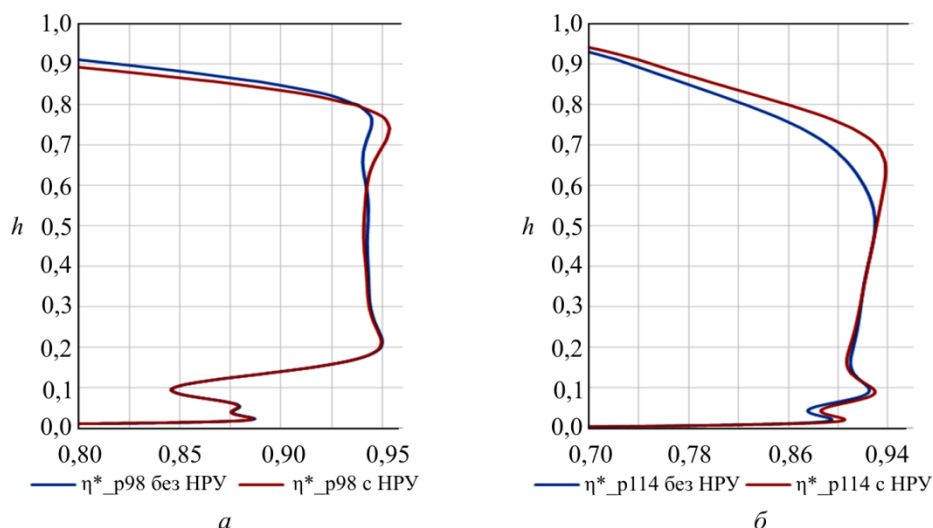


Рис. 6. Радиальное распределение КПД  $\eta^*$  за спрямляющим аппаратом:  
 а – Л.Р.Р.; б – граница ГДУ

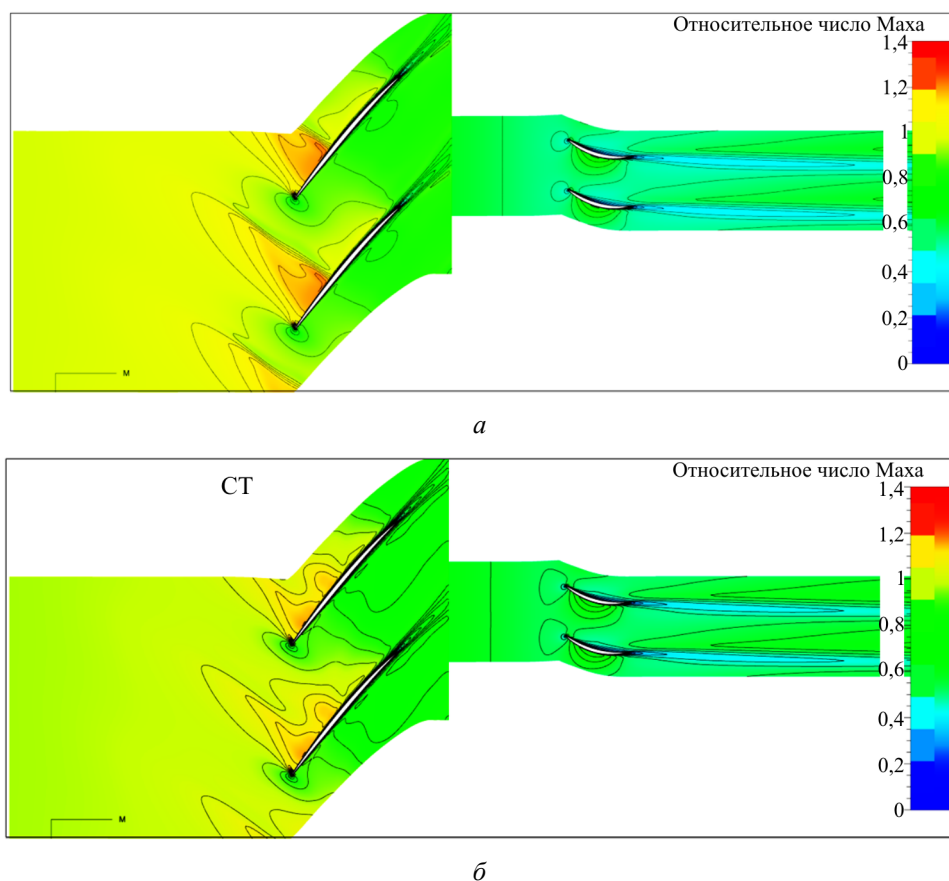


Рис. 7. Распределение значений числа Маха в межлопаточных каналах ступени:  
 а – Л.Р.Р.  $G = 64,25$  кг/с,  $\pi^* = 1,303$ ,  $\eta^* = 0,906$ ,  $0,95h$ , без НРУ;  
 б – Л.Р.Р.  $G = 64,14$  кг/с,  $\pi^* = 1,302$ ,  $\eta^* = 0,901$ ,  $0,95h$ , с НРУ

Анализ полученных интегральных характеристик для вариантов с гладкой проточной частью и с НРУ показал, что в правой части напорной ветки (при расходе воздуха, превышающем значение в точке с максималь-

ным КПД) для варианта с НРУ отмечается снижение КПД на 0,5 %. Степень повышения давления и расход воздуха снижаются в меньшей степени. В левой части напорной ветки наблюдается противоположный эффект

влияния НРУ: степень повышения давления, КПД и расход воздуха для варианта с НРУ превышают значения для варианта с гладкой проточной частью в соответствующих точках по противодавлению. Степень повышения давления возрастает на  $\sim 0,4$  %, а адиабатический КПД на  $\sim 1$  %. Полученный эффект воздействия надроторного устройства на аэродинамические характеристики вентиляторной ступени соответствует традиционным представлениям о работе надроторного устройства в части повышения характеристик вблизи границы устойчивой работы компрессора.

На рис. 5–6 представлены радиальные распределения величин степени повышения полного давления и адиабатического КПД в наружном контуре в сечении за спрямляющим аппаратом для вариантов с гладкой проточной частью и НРУ. Для анализа выбраны точки на линии рабочих режимов и вблизи границы ГДУ (табл. 2).

На рис. 7 представлено распределение значений числа Маха в относительном движении в межлопаточных каналах рабочего колеса и спрямляющего аппарата в сечении 95 % высоты проточной части для точки вблизи линии рабочих режимов. Видно сильное влияние НРУ на структуру ударных волн.

#### **Влияние надроторного устройства на акустические характеристики вентилятора**

Расчеты акустических характеристик ступени были проведены на режиме «посадка» (данный режим наименее требователен к разрешению сетки). Построенная в предыдущем подразделе сетка имела разрешение, достаточное для того, чтобы обеспечивать расчет возмущений на первой, второй и третьей гармониках частоты следования лопаток ротора без сильных искажений.

Расчет тонального шума вентилятора без НРУ был проведен с помощью NLH-метода в базовой постановке. В каждом венце рассматривалось одно возмущение, характеризуемое четырьмя гармониками. Расчет для вентилятора с НРУ был проведен с помощью NLH-метода второго ранга [15]. В данном случае необходимость использования метода

второго ранга была обусловлена тем, что только этот метод позволяет описать взаимодействие наиболее сильных компонентов шума, генерируемого при ротор / статор-взаимодействии, с НРУ.

В расчете с использованием метода второго ранга частота возмущений в блоках статора и НРУ была ограничена третьей гармоникой частоты следования лопаток ротора. Необходимость уменьшить число рассматриваемых гармоник была продиктована ограничениями на доступный объем памяти. В статоре рассматривались как возмущения, генерируемые ротором, так и возмущения, генерируемые НРУ, а также возмущения, возникающие при взаимодействии ротора и НРУ. Всего рассматривалось 24 возмущения. Аналогично в НРУ рассматривалось 24 возмущения – возмущения, генерируемые ротором, генерируемые статором, а также возмущения, возникающие при взаимодействии ротора и статора. В блоках, связанных с ротором, учитывалось восемь возмущений – три связанных со статором, три с НРУ и два со взаимодействием между НРУ и статором (эти два возмущения были добавлены автоматической системой определения набора гармоник в венце и не играют существенной роли в рамках расчета). Для проведения расчета с таким большим числом гармоник было задействовано около 700 Гб оперативной памяти и 82 физических ядра на кластере ЦИАМ. Для достижения сходимости потребовалось примерно 200 ч.

Дополнительно был проведен расчет с использованием базового NLH-метода с теми же настройками, что и для основного расчета. Результаты такого расчета не могут считаться достоверными, так как в рамках расчета не учитывается взаимодействие между возмущениями, генерируемыми при ротор / статор-взаимодействии, и НРУ. Более того, взаимодействие таких возмущений с интерфейсом между ротором и НРУ, вероятно, может приводить к нефизической утечке акустической мощности из тракта вентилятора через интерфейс. Тем не менее представляется интересным оценить степень ошибки, которую вносит использование данного метода (отметим, заметно менее требовательного к вычислительным ресурсам).

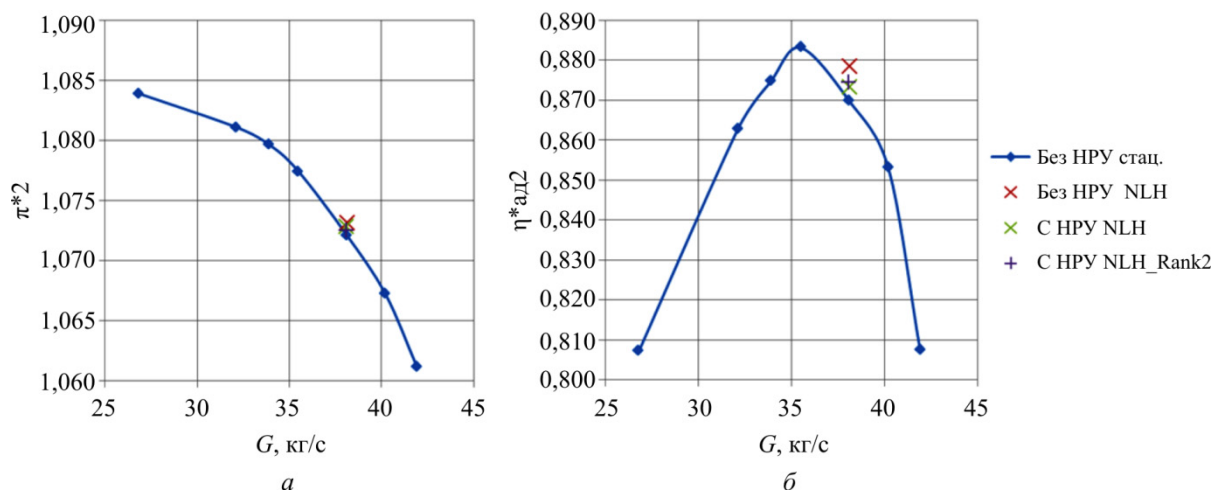


Рис. 8. Интегральные характеристики ступени – режим «посадка»:  $a$  – степень повышения полного давления;  $b$  – КПД

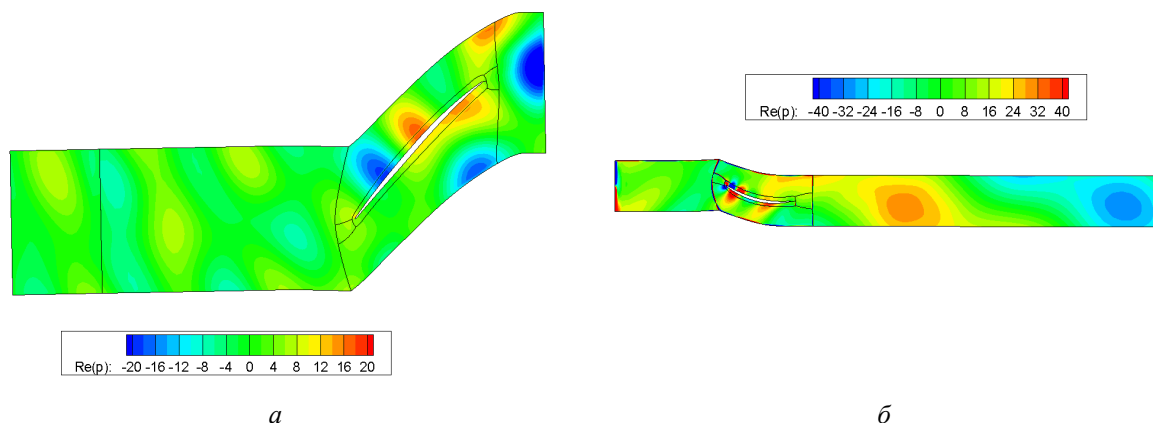


Рис. 9. Действительная часть статического давления на цилиндрическом сечении расчетной области с  $d = 0,9D$ :  $a$  – блоки, связанные с ротором. Гармоника с частотой  $\omega = 47\Omega$ ;  $b$  – блоки, связанные со статором. Гармоника с частотой  $\omega = 36\Omega$

Результаты расчетов для аэродинамических интегральных характеристик представлены на рис. 8, наряду с кривыми интегральных характеристик для оборотов  $N = 48 \%$ . Анализ полученных результатов для режима «посадка» показал, что применение метода нелинейного гармонического анализа (NLH) для расчета вентилятора с гладкой проточной частью приводит к незначительным изменениям степени повышения давления и расхода воздуха в рассматриваемой точке. Адиабатический КПД в NLH-расчете оказался выше на 0,8 % по сравнению с классическим стационарным расчетом для вариантов с гладкой проточной частью. Влияние надроторного устройства на КПД на режиме «посадка» со-

стоит в снижении КПД в рассматриваемой точке на 0,4 % по методу NLH 2-го ранга. Не наблюдается существенного различия между разными вариантами NLH-расчетов.

Результаты расчета нестационарных полей течения для вентилятора без НРУ представлены на рис. 9. Показано распределение нестационарного поля полного давления на цилиндрическом сечении расчетной области. Видно, что уровни пульсаций вниз по потоку от вентилятора существенно сильнее, чем уровни пульсаций вверх по потоку.

Для того чтобы проанализировать влияние надроторного устройства на поле течения в вентиляторе, был проведен анализ нестационарного поля течения на трех поверхно-



стях, одна из которых находится вверх по потоку от ротора, а две – вверх и вниз по потоку от статора. Положение поверхностей для модального анализа показано на рис. 3. На первой из них анализировался шум, излучаемый вентилятором против потока. Поля течения для отдельных гармоник были разложены на акустические (радиальные) моды, распространяющиеся против потока в коаксиальном канале с однородным течением [18]. На третьей поверхности аналогичным образом был проведен анализ шума, излучаемого вентилятором по потоку (разложение проводилось по радиальным модам, распространяющимся по потоку). На второй поверхности анализировалось влияние НРУ на следы за ротором и поле течения в осевом зазоре. Для этого поле течения на этой поверхности было разложено на азимутальные моды (гармонические функции времени и азимутального угла). Подобный анализ был проведен для всех трех расчетов.

Результаты модального анализа на поверхности 1 в виде уровней звуковой мощности для распространяющихся против потока азимутальных мод (для каждой азимутальной моды были просуммированы мощности соответствующих ей радиальных мод), возникающих при ротор / статор-взаимодействии, представлены на рис. 10. Результаты расчета для вентилятора без НРУ показаны синим, с НРУ с помощью базового NLH-метода – фиолетовым, с НРУ с помощью NLH-метода 2-го ранга – бежевым. Всего по результатам модального анализа было об-

наружено четыре моды с частотами, соответствующими второй, третьей и четвертой гармоникам частоты следования лопаток. Каждая мода обозначена своей частотой, выраженной через частоту следования лопаток ротора вентилятора  $F$ , и азимутальным числом  $m$ . Также показаны суммарные уровни мощности тонального шума для всех мод с частотами, соответствующими второй и третьей гармоникам, и с частотами, соответствующими второй, третьей и четвертой гармоникам частоты следования лопаток. Видно, что вклад в тональный шум возмущений с частотой, соответствующей четвертой гармонике частоты следования лопаток, относительно мал. Таким образом, то, что расчет для четвертой гармоники частоты следования в рамках расчета взаимодействия с помощью NLH-метода 2-го ранга не проводился, по-видимому, не оказало существенного влияния на полученные результаты.

Видно, что наличие НРУ приводит к некоторому снижению мощности шума, излучаемого из воздухозаборника. Для наиболее сильной моды, которая определяет шум вентилятора, согласно рассматриваемым расчетам, снижение составило 2,8 дБ для расчета с использованием базового NLH-метода и 0,6 дБ для расчета, проведенного с помощью NLH-метода 2-го ранга. Суммарное для всех мод снижение шума составило 2,4 дБ для расчета с использованием базового NLH-метода и 0,6 дБ для расчета, проведенного с помощью NLH-метода 2-го ранга.

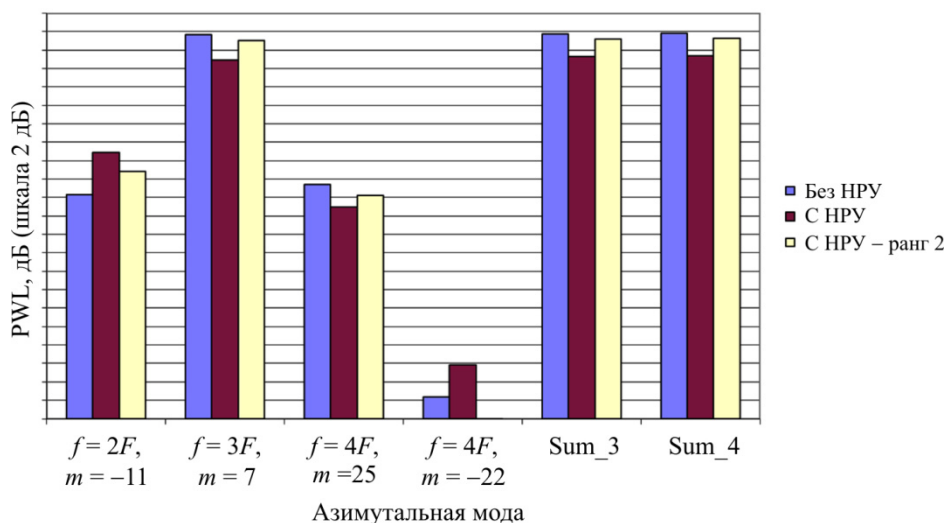


Рис. 10. Результаты модального анализа на поверхности 1

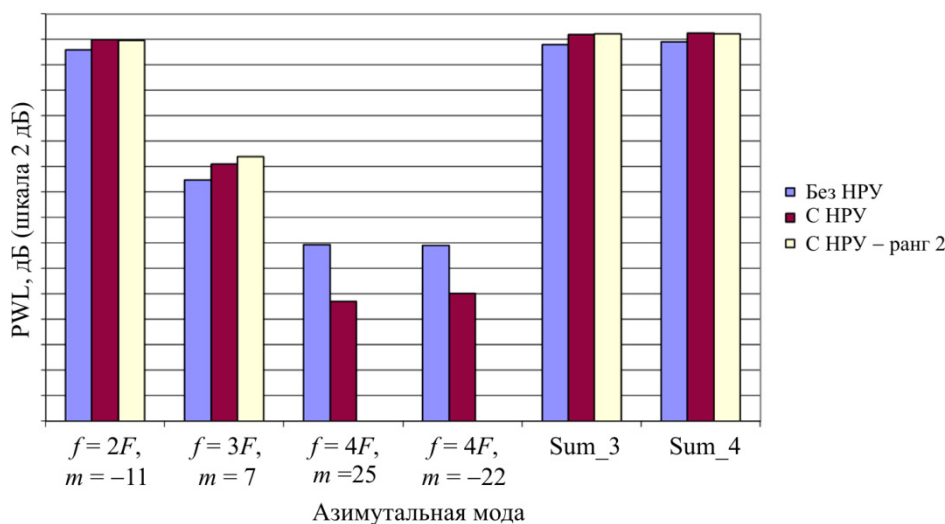


Рис. 11. Результаты модального анализа на поверхности 3

Результаты модального анализа на поверхности 3 в виде уровней звуковой мощности для распространяющихся по потоку окружных мод представлены на рис. 11, также на рисунке показаны суммарные уровни мощности шума. Видно, что, так же как и в случае излучения по потоку, то, что в расчете NLH-метода 2-го ранга было рассмотрено только три гармоники, по-видимому, не оказало существенного влияния на полученные результаты.

Наличие НРУ приводит к усилению шума, излучаемого из сопла. Суммарное для всех мод повышение шума составило 0,8 дБ как для расчета с использованием базового NLH-метода, так и для расчета, проведенного с помощью NLH-метода 2-го ранга.

Поскольку для данного вентилятора шум, излучаемый из сопла, имеет существенно большую мощность, чем шум, излучаемый из воздухозаборника, в целом по сумме излучения по и против потока шум вентилятора при наличии данного НРУ возрастает на 0,8 дБ.

Существенное различие между результатами расчета с использованием базового NLH-метода (который не описывает взаимодействие между шумом и НРУ) и расчета, выполненного с помощью NLH-метода 2-го ранга, для шума, излучаемого вперед, показывает, что использование базового метода не обеспечивает достаточной точности при расчете акустических характеристик вентиляторов с НРУ.

Для того чтобы исследовать влияние НРУ на поле течения в вентиляторе, был про-

веден модальный анализ поля течения на поверхности 2, расположенной перед статором. На рис. 12 приведен график зависимости осевой скорости от радиуса для осредненного по окружному направлению среднего поля течения, а также графики зависимости для амплитуд пульсаций осевой скорости для азимутальных мод, описывающих компоненты следа ротора для второй и третьей гармоник частоты следования лопаток. Видно, что наличие НРУ оказывает влияние на среднее поле течения и на следы, прежде всего, в области втулки. Как для компоненты следа на второй гармонике частоты следования лопаток, так и для компоненты следа на третьей гармонике наблюдается усиление следа вблизи втулки. Вероятно, этот эффект ответственен за общее повышение мощности тонального шума вентилятора.

За пределами области вблизи нижней обечайки наружного контура следы для вентилятора без НРУ несколько сильнее, чем для вентилятора с НРУ. Это указывает на то, что в принципе установка НРУ для данного вентилятора может способствовать снижению шума.

На рис. 13 приведены графики зависимости амплитуд пульсаций давления от радиуса для мод  $f = 3F, m = -11$  и  $f = 4F, m = 7$ . Видно, что наличие НРУ приводит к существенному изменению характера пульсаций давления на поверхности 2. По-видимому, это изменение следует связать прежде всего с изменением характера генерации возмущений

на статоре вентилятора. На это указывают близкие результаты для расчетов с использованием разных NLH-методов. Если бы разница в полях пульсаций возникала бы из-за отражений от ротора, то характер отражений должен был бы зависеть от граничных усло-

вий на периферии рабочего колеса, которые для этих двух методов для шума, генерируемого при ротор / статор-взаимодействии, существенно отличаются. Изменение в характере генерации, в свою очередь, связано с изменением структуры следов.

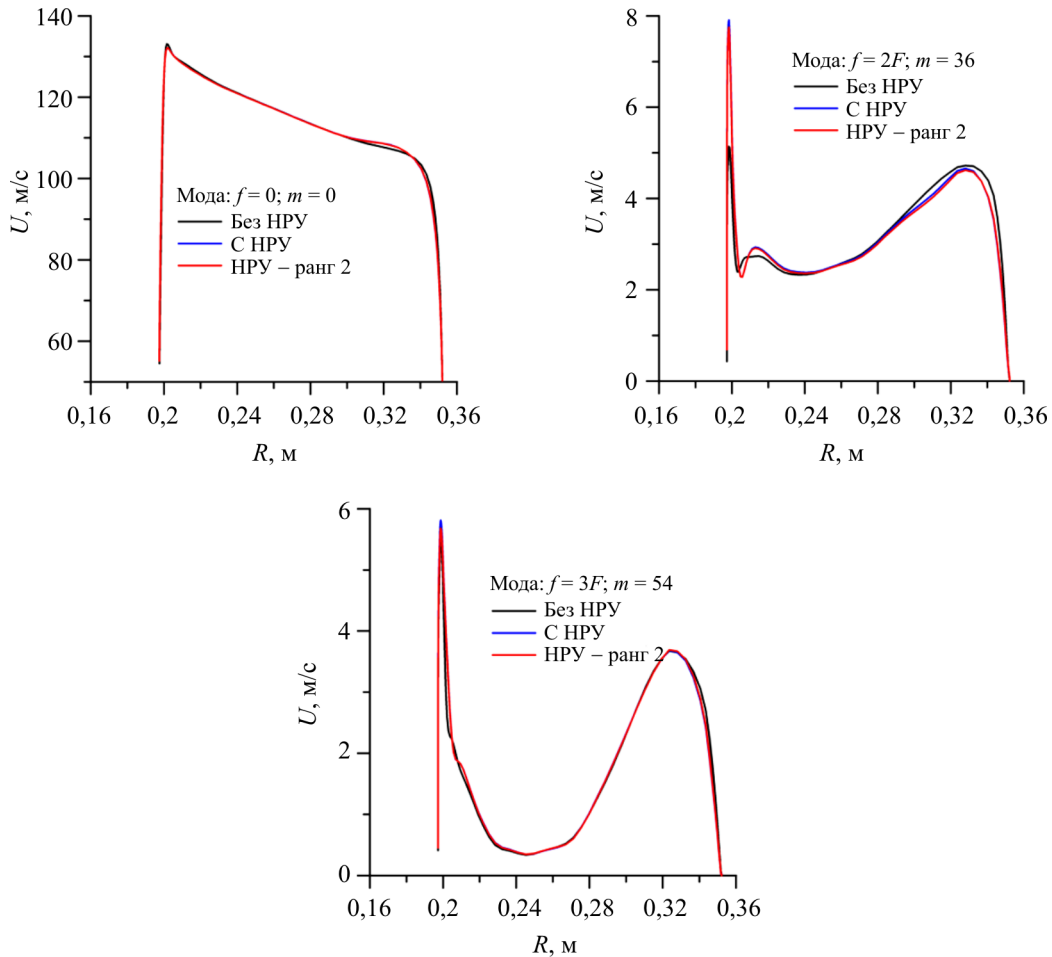


Рис. 12. Влияние НПУ на поле течения и след за ротором.  
Поле осевой скорости. Поверхность 2

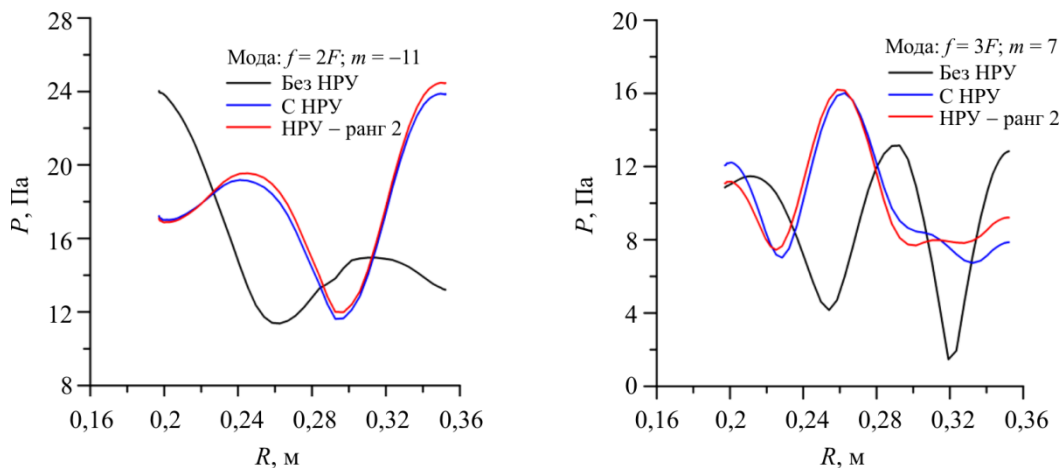


Рис. 13. Влияние НПУ на поле течения и след за ротором.  
Поле статического давления. Поверхность 2

В целом, однако, влияние НРУ на шум определяются не только воздействием НРУ на поле течения, но, вероятно, и непосредственным взаимодействием шума с НРУ при его прохождении через межлопаточные каналы рабочего колеса. То, что влияние НРУ на шум вентилятора может определяться несколькими факторами, существенно затрудняет анализ полученных результатов. Для того чтобы выработать рекомендации по улучшению качества НРУ как системы шумоглушения, необходимо более подробно исследовать взаимодействие НРУ с приходящими на него возмущениями. Сравнительное исследование взаимодействия ротора без НРУ и с НРУ с наперед заданными акустическими возмущениями, приходящими на ротор со стороны статора, могло бы существенно расширить понимание особенностей взаимодействия акустических возмущений и НРУ.

Следует также более подробно исследовать влияние НРУ на следы за ротором вентилятора. Возможно, более аккуратный подбор параметров НРУ может позволить на всех режимах снизить амплитуду следов вблизи обечайки без существенного влияния на характер течения при меньших радиусах.

В данной работе исследование акустических характеристик было ограничено режимом «посадка» в силу имеющихся ограничений по доступной вычислительной мощности. В дальнейшем планируется провести расчет и для режима «взлет». Результаты анализа решения, полученного на грубой сетке, показывают, что интенсивность следов за лопаткой ротора при установке НРУ на этом режиме снижается.

### Заключение

В работе представлено исследование влияния НРУ на акустические и аэродинамические характеристики вентилятора со сверхвысокой степенью двухконтурности с помощью программного комплекса NUMTCA FINE/Turbo. Для расчета нестационарного поля течения в вентиляторе использовался гармонический NLH-метод.

Для режима «взлет» с использованием базового метода NLH было исследовано влияние НРУ на аэродинамические характе-

ристики вентилятора. Показано, что в правой части напорной ветки (при расходе воздуха, превышающем значение в точке с максимальным КПД) для варианта с НРУ отмечается снижение КПД на 0,5 %. Степень повышения давления и расход воздуха снижаются в меньшей степени. В левой части напорной ветки наблюдается противоположный эффект влияния НРУ: степень повышения давления возрастает на ~0,4 %, а адиабатический КПД на ~1 %. Полученный эффект воздействия надроторного устройства на аэродинамические характеристики вентиляторной ступени соответствует традиционным представлениям о работе надроторного устройства в части повышения характеристик вблизи границы устойчивой работы компрессора.

На режиме «посадка» влияние НРУ выражается в снижении адиабатического КПД на величину  $\approx 0,4$  % по сравнению с гладкой проточной частью. Степень повышения давления и расход воздуха изменяются слабо. Анализ полей течения в межлопаточных каналах показал, что эффект воздействия НРУ на обтекание профилей рабочих лопаток наблюдается только в периферийной зоне (более 95 % высоты лопаток) и у втулки в отрывной зоне.

Результаты расчетов в NLH-постановке использованы для анализа влияния НРУ на акустические характеристики вентилятора на режиме «посадка». Показано, что для излучения против потока суммарное для всех азимутальных мод снижение шума составило 2,4 дБ для расчета с использованием базового NLH-метода и 0,6 дБ для расчета, проведенного с помощью NLH-метода 2-го ранга. Для излучения по потоку суммарное для всех мод повышение шума составило 0,8 дБ для расчета с использованием как базового NLH-метода, так и NLH-метода 2-го ранга. В целом по сумме излучения по и против потока шум вентилятора при наличии данного НРУ на режиме «посадка» повышается на 0,8 дБ.

Существенное различие между результатами расчета с использованием базового NLH-метода и расчета, выполненного с помощью NLH-метода 2-го ранга, для шума, из-

лучаемого вперед, показывает, что использование базового метода не обеспечивает достаточной точности при расчете акустических характеристик вентиляторов с НРУ.

Анализ поля течения показывает, что повышение уровня шума для вентилятора с НРУ определяется повышением интенсивности следов в области вблизи втулки.

Поскольку влияние НРУ на шум вентилятора определяется не одним, а несколькими факторами, необходимо провести исследование влияния этих факторов по отдельности. Прежде всего, требуется провести исследование взаимодействия проходящих через ротор акустических возмущений с НРУ, чтобы определить особенности работы НРУ как глушителя шума.

### Библиографический список

1. Povarkov V., Khaletsky Y., Shipov R. The effect of casing treatment on the scale fan noise // Twelfth International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, 11–14 July 2005. – Lisbon, 2005. – Vol. 1. – P. 857–864.
2. Elliott D. The potential benefits of advanced casing treatment for noise attenuation in ultra-high bypass ratio turbofan engines // 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2006), Honolulu, Hawaii, December 3–6, 2006. – Honolulu, Hawaii, 2006. – 17 p.
3. Khaletskii I., Mileshin V. Experimental study of casing treatment impact on ducted counter-rotating fan noise // Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires, Argentina. – Buenos Aires, Argentina, 2016. – Paper 2016-108. – 10 p.
4. Influence of the casing treatment design parameters on the ducted counter rotating fan noise / I. Khaletskii, V. Korznev, V. Mileshin, Ya. Pochkin // Proceeding of the 24th International Congress on Sound and Vibration, London, Great Britain, 2017 July 23–27 / Curran Associates. – London, Great Britain, 2017. – Vol. 2. – P. 1150–1157.
5. Experimental investigations on the effect of slot-type casing treatments with the aim of improvement the aerodynamic and acoustic characteristics of advanced fans / V. Mileshin, S. Markov, V. Korzhnev, I. Khaletskii // GT2020-14955, ASME Turbo Expo 2020. – 2020. – P. 17–28.
6. Development of direct-driven and geared fan stages with reduced tip speeds / S.V. Pankov, V.I. Mileshin, I.K. Orekhov, V.A. Fateev // GT2017-64585, ASME Turbo Expo 2017. – 2017. – Vol. 2. – P. A036.
7. Local and global analysis of a variable pitch fan turbofan engine / A. Joksimović, S. Duplaa, Y. Bousquet, X. Carbonneau, N. Tantot // ETC2017-073, 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC12, Stockholm, Sweden, April 3–7, 2017. – Stockholm, Sweden, 2017. – 12 p.
8. Verdon J.M. Linearized unsteady aerodynamic analysis of the acoustic response to wake/blade-row interaction // NASA/CR. – 2001. – No. 2001-210713. – 94 p.
9. Advanced numerical methods for the prediction of tonal noise in turbomachinery. Part II: Time-linearized methods / C. Frey, G. Ashcroft, H. Kersken, C. Weckmüller // GT2012-69418, ASME Turbo Expo, June 11–15, 2012. – Copenhagen, Denmark, 2012. – Vol. 8. – P. 1779–1789.
10. McMullen M., Jameson A. and Alonso J. Application of a non-linear frequency domain solver to the euler and navier – stokes equations // AIAA paper 02-0120. – AIAA 40th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, January 2002. – Reno, Nevada, 2002. – 16 p.
11. Rossikhin A.A. Frequency-domain method for multistage turbomachine tone noise calculation // International Journal of Aeroacoustics. – 2017. – Vol. 16, no. 6. – P. 491–506.
12. Voigt G., Ashcroft G. On the extension of a harmonic balance method for the simulation of compressor casing treatments // ASME Turbo Expo 2016, Seoul, South Korea, June 13–17, 2016. – Seoul, South Korea, 2016. – GT2016-56990. – 12 p.
13. Hirsch Ch. Numerical computation of internal and external flows. – John Wiley & Sons, 1990. – Vol. 2. – 859 p.
14. He L., Ning W. Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines // AIAA Journal. – 1998. – Vol. 36, no. 11. – P. 2005–2012.
15. The nonlinear harmonic method: from single stage to multi-row effects / S. Vilmin, E. Lorrain, B. Tartinville, A. Capron, C. Hirsch // International Journal of Computational Fluid Dynamics. – 2013. – Vol. 27. – P. 88–99.
16. Yang Z., Shih T.H. A  $k-\varepsilon$  model for turbulence and transitional boundary layer // Near-Wall Turbulent Flows, R.M.C. So. / ed. by C.G. Speziale and B.E. Launder. – Elsevier-Science Publishers B.V., 1993. – P. 165–175.

17. Jameson A. Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings // AIAA. – 1991. – No. 91. – P. 1596.
18. Tyler J.M., Sofrin T.G. Axial flow compressor noise studies // SAE Transactions. – 1962. – Vol. 70. – P. 309–332.

### References

1. V. Povarkov, Y. Khaletsky, R. Shipov, – The effect of casing treatment on the scale fan noise, – Twelfth International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, 11-14 July 2005, vol. 1, pp. 857-864.
2. D. Elliott, – The Potential Benefits of Advanced Casing Treatment for Noise Attenuation in Ultra-High Bypass Ratio Turbofan Engines, – 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2006), Honolulu, Hawaii, December 3–6, 2006, 17 p.
3. Iurii Khaletskii, Victor Mileshin. Experimental study of casing treatment impact on ducted counter-rotating fan noise. Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires, Argentina, Paper 2016-108, (2016), 10 p.
4. Khaletskii I., Korznev V., Mileshin V., Pochkin Ya. Influence of the Casing Treatment Design Parameters on the Ducted Counter Rotating Fan Noise// Proceeding of the 24th International Congress on Sound and Vibration. London, Great Britain, 2017 July 23-27. Curran Associates, 2017, vol. 2. P. 1150-1157
5. Victor Mileshin, Sergey Markov, Vladimir Korzhnev, Iurii Khaletskii, Experimental Investigations on the Effect of Slot-Type Casing Treatments with the Aim of Improvement the Aerodynamic and Acoustic Characteristics of Advanced Fans, GT2020-14955, ASME Turbo Expo 2020, 2020, pp. 17-28.
6. Pankov S.V., Mileshin V.I., Orekhov I.K., Fateev V.A., Development of Direct-Driven And Geared Fan Stages With Reduced Tip Speeds, GT2017-64585, ASME Turbo Expo 2017, 2017, Vol. 2, P. A036.
7. A. Joksimović, S. Duplaa, Y. Bousquet, X. Carbonneau, N. Tantot, Local And Global Analysis Of A Variable Pitch Fan Turbofan Engine, ETC2017-073, 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC12, April 3-7, 2017; Stockholm, Sweden, 12 p.
8. Verdon, J.M. – Linearized Unsteady Aerodynamic Analysis of the Acoustic Response to Wake/Blade-Row Interaction, NASA/CR—2001-210713, 2001, 94 p.
9. Frey C., Ashcroft G., Kersken H., Weckmüller C. – Advanced Numerical Methods For The Prediction Of Tonal Noise In Turbomachinery, Part II: Time-Linearized Methods, GT2012-69418, ASME Turbo Expo, 2012, Copenhagen, Denmark, June 11-15, 2012, vol. 8, pp. 1779-1789.
10. McMullen M., Jameson A. and Alonso J. – Application of a Non-Linear Frequency Domain Solver to the Euler and Navier-Stokes Equations, AIAA paper 02-0120, AIAA 40th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, January 2002, 16 p.
11. Rossikhin A.A. – Frequency-Domain Method For Multistage Turbomachine Tone Noise Calculation, International Journal of Aeroacoustics, vol. 16, num. 6, pp. 491-506, 2017.
12. Voigt G., Ashcroft G., On the Extension of a Harmonic Balance Method for the Simulation of Compressor Casing Treatments, GT2016-56990, ASME Turbo Expo 2016, Seoul, South Korea, June 13-17, 2016, 12 p.
13. Hirsch Ch. – Numerical Computation of Internal and External Flows, Volume 2, John Wiley & Sons, 1990, 859 p.
14. He, L. and Ning, W., 1998, “Efficient Approach for Analysis of Unsteady Viscous Flows in Turbomachines”, AIAA Journal, vol. 36, no. 11, pp. 2005-2012.
15. Vilmin S., Lorrain E., Tartinville B., Capron A., Hirsch C. – The nonlinear harmonic method: from single stage to multi-row effects, International journal of computational fluid dynamics, vol. 27, pp. 88-99, 2013.
16. Yang Z. and Shih T.H., 1993, "A k-ε model for turbulence and transitional boundary layer", Near-Wall Turbulent Flows, R.M.C. So., C.G. Speziale and B.E. Launder(Editors), Elsevier-Science Publishers B.V., pp. 165-175
17. Jameson, A., 1991, "Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings", AIAA-Paper 91-1596.
18. Tyler J.M., Sofrin T.G. Axial Flow Compressor Noise Studies, SAE Transactions, 1962, vol. 70, pp. 309-332.

### Об авторах

**Дружинин Ярослав Михайлович** (Москва, Россия) – научный сотрудник ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2; e-mail: ymdruzhinin@ciam.ru).

**Милешин Виктор Иванович** (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, начальник отделения ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2; e-mail: mileschin@ciam.ru).

**Россихин Антон Анатольевич** (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, начальник сектора ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2; e-mail: aarossikhin@ciam.ru).

### About the authors

**Yaroslav M. Druzhinin** (Moscow, Russian Federation) – Researcher, Central Institute of Aviation Motors (CIAM) (2, Aviamotornaya st., 111116, Moscow, Russian Federation; e-mail: ymdruzhinin@ciam.ru).

**Viktor I. Mileschin** (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Division, Central Institute of Aviation Motors (CIAM) (2, Aviamotornaya st., 111116, Moscow, Russian Federation; e-mail: mileschin@ciam.ru).

**Anton A. Rossikhin** (Moscow, Russian Federation) – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors (CIAM) (2, Aviamotornaya st., 111116, Moscow, Russian Federation; e-mail: aarossikhin@ciam.ru).

Получено 23.06.2021