DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.10
УДК 534.83:532.525.2

Л.А. Рыбинская, Р.В. Бульбович, В.И. Кычкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ШУМА ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Одной из актуальных задач современного гражданского авиастроения является обеспечение комфортной среды жилых территорий для населения, подвергающегося воздействию авиационного шума. Шум реактивной струи газотурбинного двигателя является одним из мощных источников акустического загрязнения. В силу этого большое и разностороннее внимание исследователей обращено как к методам прогнозирования шума струи, так и к методам и средствам его снижения.

В статье описаны основные источники шума самолета и основные способы борьбы с шумом, генерируемым данными источниками. Проведен обзор методов снижения шума реактивной струи газотурбинного двигателя. Описаны основные методы снижения шума струи авиационного двигателя: шевронные сопла, микроструи, плазменные актуаторы, экранирование и др. Представлены механизмы, за счет которых выполняется снижение шума, и реализация этих методов. Также выполнена структуризация методов: представлены основные характеристики метода; средний уровень снижения шума в децибелах, который обеспечивает метод; преимущества и недостатки метода. Сделано заключение о полноте реализации данных методов в задаче снижения шума «чистой» струи и перспективах их применения в новых задачах снижения шума гражданских самолетов.

Ключевые слова: аэроакустика, шум турбулентной струи, шеврон, плазменный актуатор, микроструи, экранирование шума струи, акустическая заглушенная камера, струйная установка.

L.A. Rybinskaya, R.V. Bulbovich, V.I. Kychkin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EFFICIENCY OF THE METHODS TO REDUCE TURBULENT JET NOISE

One of the urgent problems of modern commercial aircraft building is guaranteeing comfortable environment in urban residential districts undergoing aviation noise. Jet noise of gas-turbine engine is one of the powerful sources of acoustic contamination. Thereby researchers pay much attention both to forecasting approaches of noise generation and to methods of noise reduction.

The article describes main noise sources of an aircraft and main approaches to reduce noise generated by this sources. It is reviewed detailed the methods to reduce jet noise of aircraft engine: chevron nozzles, microjets, plasma actuators, shielding and the others. The mechanisms of noise reduction in these methods are considered in brief. These methods are also structured. It is shown main characteristics of the method, the level of noise reduction ensured by the method, advantages and disadvantages of the method. It is concluded on efficiency of these methods to reduce noise of the net jet and prospects to use them in solution of the new problems of civil aircraft noise reduction.

Keywords: aeroacoustics, turbulent jet noise, chevron, plasma actuator, microjet, jet noise shielding, acoustic anechoic chamber, jet rig.

Установление источников и разработка методов снижения акустического шума летательных аппаратов (ЛА) имеют большую историю. Впервые об этом заговорили инженеры и экологи в середине прошлого века [1] в связи с активным развитием гражданской авиации и появлением самолетов с турбореактивными двигателями, которые сразу привели к проблеме воздействия акустического шума на население.

На сегодняшний день снижение шума остается одной из ключевых технических и экологических проблем авиации. На 386-й Ассамблее ИКАО (ICAO – International Civil Aviation Organization), состоявшейся в октябре 2013 г., были введены перспективные требования по кумулятивному уровню шума самолетов (рис. 1) [2].

Кумулятивные уровни шума, соответствующие нормам стандарта ИКАО, определяются в зависимости от величины взлетной массы самолета и приводятся согласно ГОСТ 17229–85

к значениям эффективного уровня воспринимаемого шума – EPNL (EPNdB)[1]. Нормам, вводимым с 2017 г., уже не соответствует ни один производимый в России самолет.

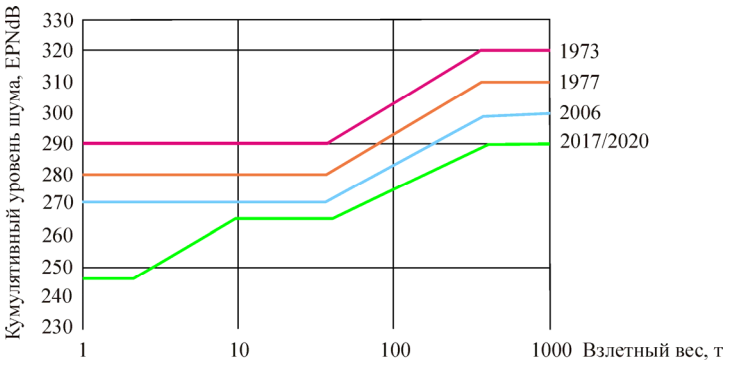


Рис. 1. Предельно допустимые уровни шума сертифицируемых самолетов [3]

К настоящему времени исследования в области борьбы с авиационным шумом достигли существенных результатов как теоретического, так и экспериментального характера. На рис. 2 представлена укрупненная структура основных подходов, используемых для решения данной задачи, и степень их эффективности. При этом необходимо отметить, что авиационный двигатель по-прежнему остается главным источником в общем шуме самолета (рис. 3).

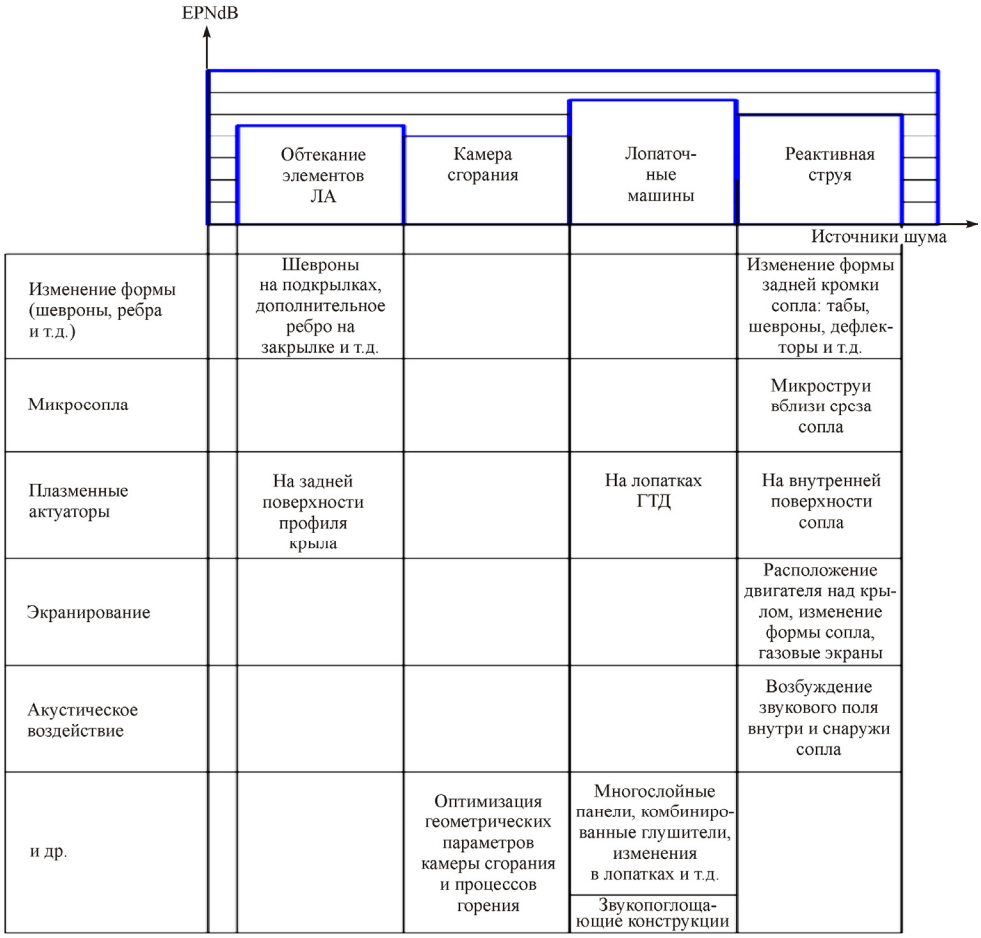


Рис. 2. Методы снижения акустического шума авиационной техники

[1] ГОСТ 17229–85. Самолеты пассажирские и транспортные. Метод определения уровней шума, создаваемого на местности. Введ. 1986-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 54 с.

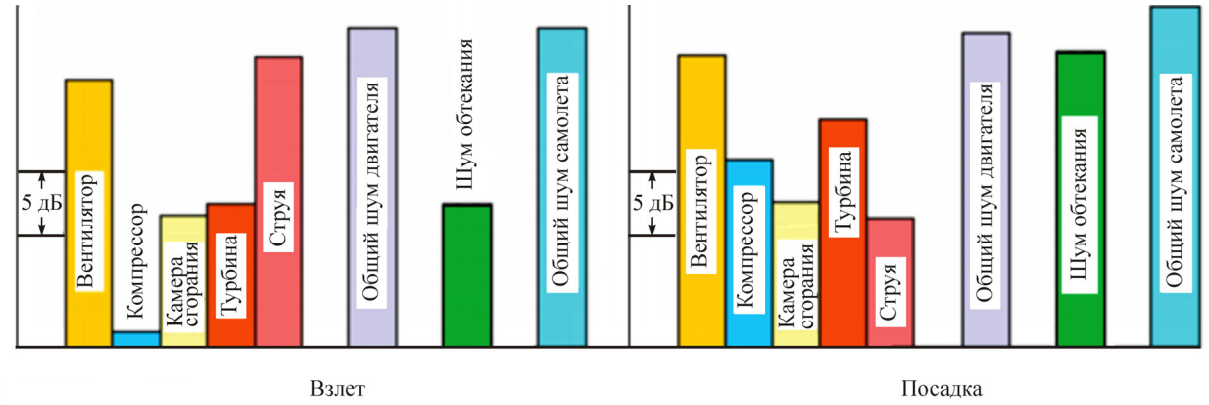


Рис. 3. Ранжирование источников шума пассажирских реактивных самолетов [4]

В целом просматривается тенденция создания новых поколений ЛА с всё более равноуровневыми источниками шума, что необходимо учитывать при дальнейшей разработке технологий подавления авиационного шума, поскольку существует риск сосредоточить множество временных и финансовых ресурсов на подавление источника звука, который окажется несущественной составляющей от общего шума двигателя. Пока же, как видно из рис. 3, в шум современного авиационного двигателя основной вклад вносят вентилятор (шум которого увеличился с увеличением двухконтурности двигателя) и струя (шум которой снизился с увеличением двухконтурности двигателя). Исторически шум струи был доминирующим для реактивных самолетов, и за многие годы накопился широкий спектр подходов для борьбы с ним.

Шевронное выхлопное сопло (рис. 4) представляет собой сопло с выступами по всему периметру, имеющими преимущественно треугольную вогнутую форму [5, 6]. Отклонения шевронов могут быть как внутрь, так и наружу или же отсутствовать. Спроектированы и подкреплены расчетами различные варианты шевронов: подвижные [5] (изменяющие положение в зависимости от режима полета), неподвижные (с разными углами наклона к струе, разным количеством, различной формы, симметричные/несимметричные), регулируемые [7], а также аэродинамические [8].

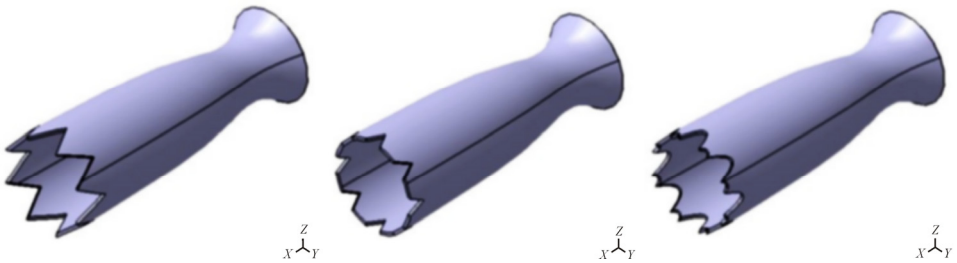


Рис. 4. Модели различных типов шевронных сопел [9]

Суть работы шевронов заключается в следующем. Газовая реактивная струя через пазы выбрасывается радиально наружу во внешний газовый поток из-за перепада давления. Благодаря этому удается устранить явление взаимного разрыва разных воздушных потоков и снизить уровень шума. Таким образом, шевроны способствуют смешиванию реактивных струй через пазы, обеспечивая возможность перемешивания горячего воздуха, выходящего из выпускного сопла, с наружным потоком. В результате этого длина начального участка перемешивания, который создает большую часть звуковой мощности, уменьшается.

При использовании шевронов наибольший эффект, которого смогли достичь по снижению шума для двухконтурной струи, составил в дальнем поле при низких и средних частотах 4–5 дБ, в ближнем поле при низких и средних частотах 3–4 дБ [10]. К негативной стороне ис-

пользования шевронов относится существенное влияние угла их заглубления на потерю тяги [7]. На массу двигателя наличие шевронов влияния не оказывает.

Влияние микроструй основано на аэродинамическом взаимодействии потока периферийных струй с основной струей, что значительно влияет на структуру течения струи. Через поперечные к оси микросопла подается газ или жидкость в слой смешения основной струи. Вдув производится по нормали к струе вблизи среза сопла (рис. 5). Причем при использовании жидкости происходит дополнительное снижение скорости потока и, как следствие, снижение акустического излучения.

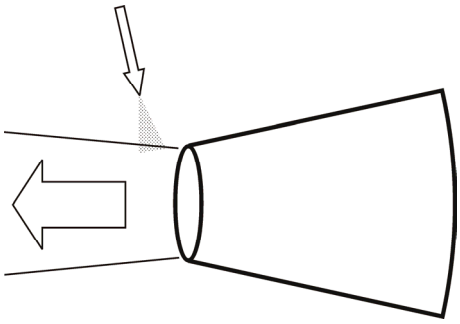


Рис. 5. Схематическое изображение вдува микроструй вблизи среза сопла

Вдув микроструй способствует интенсификации процессов смешения на начальном участке основной струи, влияет на толщину слоя смешения. При этом микроструи, вдуваемые в поток, не проникают внутрь струи, а лишь немного оттесняют слой смешения и растекаются по деформированной внешней поверхности основной струи [11]. Вблизи места вдува происходит уменьшение толщины слоя смешения, образование продольных парных крупномасштабных вихрей. Величина размера слоя смешения вблизи углов расположения микросопел при смещении вниз по потоку постепенно нарастает, что подтверждает факт диссипации продольных вихрей. За счет снижения толщины слоя смешения снижается низкочастотный шум, так как вихри создают акустическое излучение в момент, когда скорость их движения совпадает со средней скоростью в средней части слоя смешения. Парные вихри, образованные в месте контакта микроструи со слоем смешения основной струи, увеличиваются в размерах при распространении вниз по течению и приводят к образованию «гребней» на поверхности струи. При движении газа вниз по течению происходит сначала усиление продольной завихренности в виде парных продольных вихревых структур, а затем ослабление и полное затухание, что проявляется разрушением грибовидной структуры течения.

Экспериментально выявлено, что воздействие микроструй обеспечивает снижение низкочастотного шума на 1–2 дБ, при этом величина тяги сопла сохраняется, вследствие того что микроструи непосредственно не препятствуют истечению газа из основного сопла [12].

Плазменные актуаторы (ПА) в настоящее время являются перспективной областью исследования. В последнее время были исследованы и разработаны несколько типов плазменных актуаторов, из которых наиболее приемлемым для управления потоком является плазменный актуатор диэлектрического барьерного разряда (диэлектрический барьерный разряд – это электрический разряд в газовой среде, возникающий между двумя электродами, один или оба из которых покрыты диэлектриком) [13], состоящий из, как минимум, двух электродов, расположенных на противоположных сторонах диэлектрического материала асимметричным образом, подключенных к источнику переменного напряжения для создания пульсирующего коронного разряда, как показано на рис. 6.

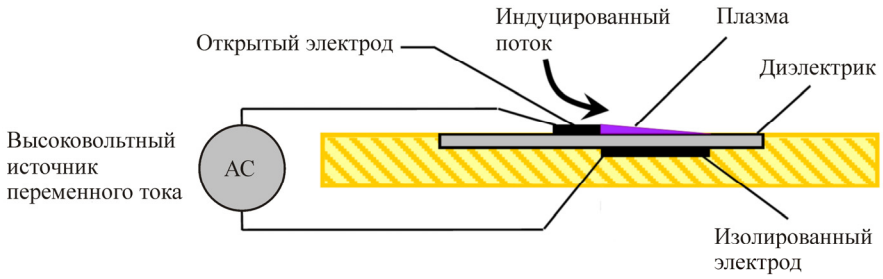


Рис. 6. Схема одиночного плазменного актуатора диэлектрического барьерного разряда

Принцип работы основан на ионизации воздуха за счет высокого напряжения, приложенного к электродам, вследствие чего образуется частично ионизированная неравновесная плазма. В результате взаимодействия заряженных частиц в плазме с электрическим полем возникает сила Лоренца (массовая сила), которая воздействует на среду. Таким образом, плазменный актуатор генерирует пристенную струю воздуха и изменяет профиль пограничного слоя [14]. При этом механизм воздействия плазменных актуаторов часто сопоставляют с аэроакустическим воздействием. Метод хорош тем, что при отсутствии разряда не создается возмущений течения струи. При генерации актуаторами возмущений с соответствующей фазой и амплитудой возмущения, развивающиеся на начальном участке слоя смешения, подавляются.

В результате проведенных экспериментов установлено, что для эффективного управления отрывом потока необходимо учитывать множество характеристик ПА, таких как: расположение актуатора, его ориентацию, геометрические размеры, относительное расположение электродов, приложенное напряжение, частоту и фазу воздействия разрядов.

Плазменные актуаторы обеспечивают снижение шума струи на 1,3 дБ в среднем, при этом их конструкции достаточно просты, так как они интегрируются в поверхность и не имеют подвижных частей [15].

Многотрубчатый насадок на срезе сопла разбивает исходную струю на множество более мелких составляющих с разделением в поперечном направлении. Насадок может быть выполнен в виде гофров, лепестков (рис. 7), трубочек, стержней, вводимых в струю, имеющих боковую поверхность больше, чем у обычного сопла, за счет чего обеспечивается увеличение эжекции воздуха, что приводит к уменьшению градиента скорости и, следовательно, снижению шума.

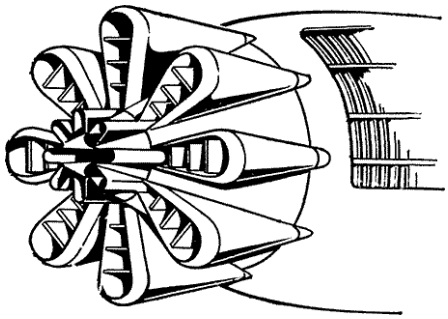


Рис. 7. Лепестковый глушитель шума струи реактивного двигателя

Протяженность начального участка зоны смешения снижается, так как насадок обеспечивает более активное перемешивание струи с окружающей средой. На этом участке истечение струй из каждого элемента насадка происходит без взаимодействия потоков, причем внешние струйки экранируют шум внутренних. Эффект укорочения участка наиболее интенсивного излучения звука, его экранирования и преломления при прохождении через слои движущегося газа в конечном итоге приводит к снижению шума и преобразованию спектрального состава. Течение во втором участке на некотором расстоянии от сопла после слияния струй представляется в виде некоторой эквивалентной струи, геометрические и газодинамические параметры которой определяются из условия постоянства количества движения.

Основными параметрами, определяющими акустическую эффективность насадка, являются расстояние между отдельными струйками (отношение площади, ограничивающей насадок, к площади среза исходного сопла), диаметр трубок, режим истечения потока. Экспериментально установлено, что максимальное снижение шума наблюдается при расстоянии между трубками, приблизительно равном их диаметру [16]. Уменьшение расстояния между трубками приводит к быстрому слиянию отдельных струй в единый турбулентный поток и к снижению акустической эффективности. Увеличение числа трубок и, следовательно, уменьшение их диаметра вызывает смещение спектра шума в область более высоких частот.

Многотрубчатый насадок обеспечивает снижение суммарной акустической мощности потока, уменьшение доли низкочастотных составляющих и смещение спектра шума в более высокочастотную область по сравнению с круглым соплом из-за увеличения поверхности смешения струй с окружающей средой на участке вблизи выходного сечения сопла.

Сетчатый экран перпендикулярно истечению струи также основан на принципе разбиения основной струи на мелкие составляющие. Экран размещается в зоне смешения перпен-

дикулярно оси струи. При этом происходит изменение структуры потока в зоне смешения, состоящей из двух участков: между срезом сопла и сетчатым экраном и вниз по потоку за сетчатым экраном. При расположении экрана на расстоянии большем диаметра сопла влияние на аэродинамические характеристики перед экраном не наблюдается. Непосредственно за сетчатым экраном наблюдается скачкообразное падение средней скорости потока, определяющееся площадью проходного сечения экрана [16]. Поскольку средняя скорость потока является основным параметром, определяющим интенсивность акустического излучения, происходит выделение шума участка струи между срезом сопла и экраном.

Сетчатые экраны позволяют управлять спектром звуковой мощности струи путем рационального подбора местоположения экрана в струе, режима истечения и относительного живого сечения [17]. Так, при уменьшении расстояния от экрана до среза сопла содержание низкочастотной составляющей в спектрах шума становится меньше. Если экран располагается в переходном или основном участках струи, снижение уровней суммарного шума практически не наблюдается, так как начальный участок, определяющий в основном шум струи, остается без изменений. Наблюдающееся увеличение составляющих высокочастотного шума обусловлено шумом обтекания остова сетчатого экрана.

Возможно появление дискретных составляющих шума при установке сетчатого экрана на начальном участке струи, обусловленных резонансными явлениями, реализующимися при наличии обратной акустической связи между экраном и выходным сечением сопла.

Стоит отметить, что применение сетчатых экранов более эффективно в сочетании с другими методами борьбы с шумом, такими, как звукопоглощающие конструкции (ЗПК).

Применение сетчатых экранов обеспечивает снижение суммарной акустической мощности потока, уменьшение доли низкочастотных составляющих и увеличение доли высокочастотных составляющих шума.

Изменение формы сопла, а именно на щелевидное прямоугольное сопло, позволяет снизить уровень генерируемого шума. Истечение из такого сопла представляет собой практически плоскую турбулентную струю (рис. 8).

Проведенные в работе [16] расчеты показали, что интенсивность шума на начальном участке, а также на переходном и основном участках для струи, истекающей из щелевидного сопла, в сравнении с соответствующей осесимметричной струей, приблизительно в два раза меньше. Это объясняется тем, что длина ядра постоянной скорости плоской струи значительно меньше длины ядра постоянной скорости осесимметричной струи с той же площадью среза. При этом спектр акустической мощности струи, истекающей из щелевидного сопла, смещен в сторону высоких частот относительно соответствующей осесимметричной струи.

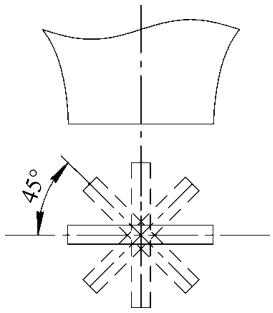


Рис. 8. Схема щелевидного прямоугольного сопла

При такой конфигурации сопла диаграмма направленности суммарного шума струи имеет форму эллипса, меньшая ось которого параллельна длинной кромке сопла. Эллипсовидность направленности шума объясняется эффектом экранирования звука турбулентным потоком, который наиболее заметно проявляется для высокочастотных составляющих шума. Вследствие большей протяженности зоны смешения в направлении, параллельном длинной кромке щелевидного сопла, эффект экранирования вызывает уменьшение уровней шума со стороны короткой кромки.

Изменение пространственной ориентации сопла при низких частотах никак не влияет на уровни шума струи. В высокочастотной области спектра наибольшие уровни шума наблюдаются со стороны длинной кромки сопла. Максимально достигнутое снижение шума для щелевидного сопла достигнуто в случае ориентации короткой кромки в сторону наблюдателя.

При малых числах Маха уровни шума для щелевидного сопла могут возрастать и превосходить по величине уровни шума для осесимметричной струи из-за преобладания источников «внутреннего» шума, образованных в результате взаимодействия потока со стенками сопла.

Экранирование шума струи вторичным газовым потоком представляет собой создание высокотемпературного газового потока между реактивной струей и окружающей средой (рис. 9). Газовый поток с меньшей скоростью вдувается вокруг основной струи, что ведет к снижению поперечного градиента средней скорости струи и, как следствие, снижению уровня турбулентности потока. Слой движущегося газа, расположенный между струей и наблюдателем, выполняет роль экрана на пути распространения звука, эффект от которого обусловлен отражением звука от внешних струй. При этом снижение уровней шума за газовым слоем сопровождается увеличением уровней шума с противоположной стороны от слоя. Суммарная акустическая мощность исходной воздушной струи при этом уменьшается.

При данной компоновке возможно экранирование шума струи и снижение интенсивности акустического излучения в каком-либо выбранном направлении. Этот способ шумоглушения характерен для двухконтурных воздушно-реактивных двигателей. Создание газового экрана возможно посредством отбора за камерой сгорания двигателя части подогретого газа и организации вторичного потока параллельно направлению истечения основного потока.

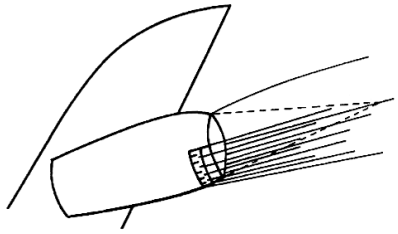


Рис. 9. Схема экранирования шума струи вторичным газовым потоком [18]

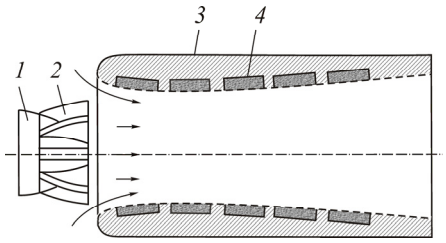


Рис. 10. Совместное применение механического и эжекторного глушителей шума: *1* – сопло; *2* – насадок; *3* – эжектор; *4* – звукопоглощающая облицовка [19]

Представленный метод основан на свойстве звуковых волн испытывать отражение и преломление при прохождении через слой движущегося газа с градиентами средней скорости, плотности и температуры движущейся среды. Соответственно, эффективность снижения шума может быть увеличена за счет увеличение температуры, а также скорости истечения воздушного потока. Причем, чем больше температура слоя, тем меньше становится влияние скорости его движения на эффективность отражения звука. Также отражающие свойства экрана могут быть улучшены за счет увеличения его толщины и разности акустических импедансов слоя и окружающей среды.

Газовый экран является эффективным методом воздействия на шум струи, особенно в области высоких частот и в области углов наблюдения, соответствующих наиболее интенсивному акустическому излучению струи (в направлениях, составляющих небольшой острый угол с направлениями истечения, либо большой угол падения на слой газа, движущегося параллельно основному потоку). Экспериментально установлено, что такой метод может привести к снижению шума до 10–12 дБ в высокочастотной области акустического спектра [12].

Эжекторное шумоглушащее сопло с многоэлементным насадком представляет собой совместное применение многоэлементного гофрированного или многолепесткового насадка и средств, осуществляющих дополнительное эжектирование воздуха через боковые стенки сопла с целью улучшения работы механического глушителя и интенсификации процесса турбулентного перемешивания. Принцип действия основан на снижении скорости струи за счет эжектирования окружающего воздуха через окна в стенках эжектора, разбиения основного потока на несколько составляющих и интенсивного перемешивания высокоскоростного потока с окружающей средой. Эффективность такой системы можно увеличить за счет облицовки внутренней поверхности эжекторной трубы ЗПК (рис. 10).

В эжекторных соплах течение струи можно разделить на две области смешения потоков. В первой области, находящейся вблизи основного сопла, внутри канала эжектора при смешении истекающих из многоэлементного насадка струй с эжектируемым воздухом генерируется высокочастотный шум, называемый «лепестковым шумом». Во второй области происходит смешение истекающего из эжекторного сопла потока с окружающей средой. Генерируемый данной областью низкочастотный шум называется «шумом смешения».

Экспериментальные исследования показали, что насадок с эжектором со звукопоглощающей облицовкой обеспечивает снижение уровней шума в области низких частот [12], при этом возможно усиление уровней шума в области высоких частот, обусловленных генерацией «лепесткового шума».

Существует множество модификаций эжекторного шумоглушащего сопла, состоящего из сопла с гофрированной обечайкой, центрального тела и эжектора, либо гофры на обечайке могут отсутствовать [16]. Возможным вариантом исполнения является шумоглушащее сопло, состоящее из обечайки, эжектора, центрального тела и полых пилонов, обеспечивающих разделение основной струи на отдельные струйные потоки и чередование их с потоком эжектируемого воздуха (рис. 11). На режиме крейсерского полета пилоны трансформируются, перекрывая поток воздуха, формируя сверхзвуковую часть сопла с низкими потерями тяги. Одновременно перекрываются окна в стенках эжектора, обеспечивая гладкую наружную поверхность мотогондолы.

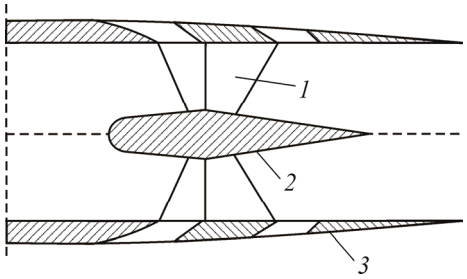


Рис. 11. Эжекторное шумоглушащее сопло с пилонами: *1* – пилоны; *2* – центральное тело; *3* – эжектор

Задача состоит в том, чтобы за счет создания систем переменной геометрии сопел минимизировать шум волновых структур и создать идеально расширенный поток в широком диапазоне перепадов давлений и режимов работы силовой установки [18]. В этом случае возрастает поверхность взаимодействия потока с окружающей средой, увеличивается эжектирующая способность струи, обеспечивающая достаточно равномерное поле скоростей на выходе из эжектора.

Применение эжекторного сопла приводит к исчезновению дискретных составляющих в спектрах шума истекающей струи по сравнению со спектрами шума исходной струи при всех углах наблюдения. Однако эти шумоглушители имеют большой вес и дают значительные потери тяги, достигающие порядка 6 %. Кроме этого условия компоновки двигателя с планером накладывают конструктивные ограничения на длину эжектора и площадь его сечения.

Акустическое воздействие может существенно изменять аэродинамические и акустические характеристики турбулентных струй. Результаты экспериментальных исследований управления аэродинамическими и акустическими характеристиками дозвуковых и сверхзвуковых турбулентных струй путем воздействия на них акустических возмущений различных интенсивности и частоты приведены в работе [20]. В исследовании [21] экспериментально изучалось как внешнее поперечное воздействие звукового облучения, так и внутреннее продольное акустическое воздействие (рис. 12).

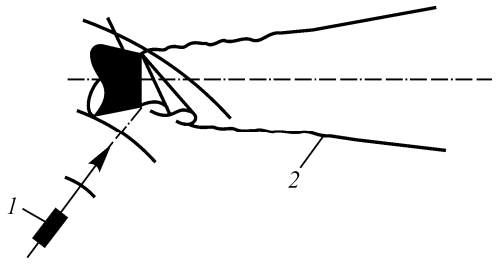


Рис. 12. Внешнее акустическое воздействие на струю: *1* – излучатель; *2* – струя

Исследования показали, что простое взаимодействие гармонического акустического сигнала со струей может приводить к существенным изменениям акустических характеристик [22]. Экспериментально подтвержден вывод, сделанный на основании теоретического ана-

лиза, что гармоническая по времени волна неустойчивости может быть погашена внешней акустической волной при условии правильного выбора ее амплитуды и фазы.

Доказано, что облучение струи звуком низкой частоты интенсифицирует процесс смешения струи, что приводит к увеличению интенсивности пульсаций скорости на начальном и переходном участках струи, утолщению слоя смешения и сокращению длины начального участка, за счет чего уровень излучаемого шума усиливается. В свою очередь, высокочастотный звук действует противоположно и снижает интенсивность турбулентного смешения и, как следствие, уровень излучаемого шума. При этом эффект от воздействия акустического динамика на струю сопоставим с эффектом от воздействия плазменных актуаторов.

Однако применение метода акустического воздействия характеризуется конструктивной сложностью исполнения, в связи с чем данный метод практически не используется. Сложность практического применения заключается в установке вблизи реактивного сопла элементов, излучающих акустические волны определенных частот.

Экранирование шума струи базируется на явлении дифракции акустических волн (рис. 13). Это звукоизолирующая преграда, в качестве которой выступает поверхность летательного аппарата, а именно элементы планера самолета. Двигатель устанавливается над поверхностью крыла или фюзеляжа, и определенная доля генерируемого им шума отражается от этой поверхности вверх, не доходя до земли. Экраны позволяют управлять звуковой мощностью струи за счет различной компоновки поверхности.

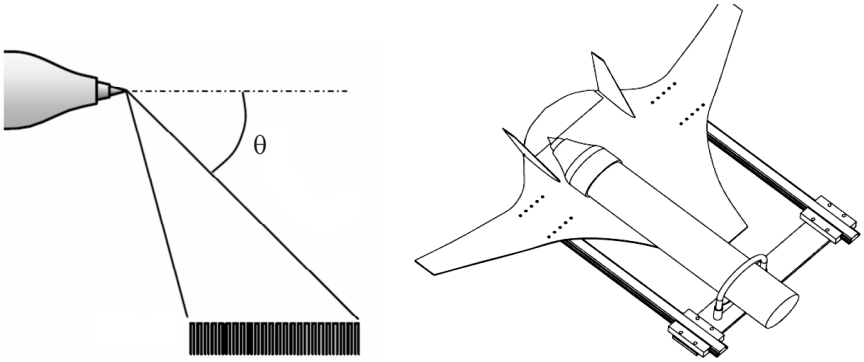


Рис. 13. Экранирование шума струи поверхностью [23]

В работе [24] показано, что эффект экранирования шума струи наблюдается в диапазоне высоких частот и усиливается при приближении струи к кромке экрана. При этом на низких частотах наблюдается значимое широкополосное усиление шума, имеющее ту же природу, что и механизм усиления шума при взаимодействии струи с отклоненными закрылками.

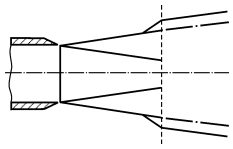
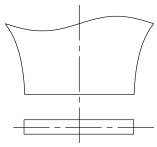
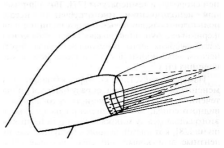
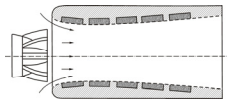
Более полно проведенный авторами анализ методов снижения шума струи с их достоинствами и недостатками представлен в таблице.

Анализ информационных материалов теоретических и экспериментальных исследований в области шумообразования реактивной струи газотурбинного двигателя (ГТД) и использования методов и средств снижения шума свидетельствуют о разностороннем подходе к решению поставленных задач. Однако принятие тех или иных технических решений для снижения шума конкретного ГТД затруднено отсутствием исчерпывающего материала, позволяющего сформировать четкие представления о совершенстве и применимости подходов. В силу сложности решения задач шумообразования и снижения шума ГТД представляется актуальным усиление интенсивности проведения экспериментов как на натурных объектах, так и в лабораториях. Однако натурные испытания требуют больших человеческих, временных и финансовых ресурсов и по этим причинам проводятся в малых количествах. Кроме того, аэроакустические исследования на натурных объектах во многом ограничиваются погодными условиями, и возможность проведения испытаний в лабораторных условиях ускоряет решение поставленных задач.

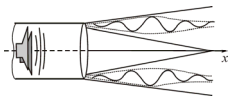
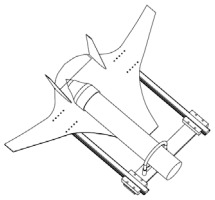
Методы снижения шума струи

Методы воздействия	Характеристики	Снижение шума	Преимущества	Недостатки
Шевронное выходное сопло	1. Кол-во шевронов 2. Угол заглубления шевронов α 3. Отношение давлений в форкамере и помещении установки 4. Степень нерасчетности струи 5. Геометрическое число Маха 6. Число Струхаля 7. Скорость струи	4–5 дБ в дальнем поле, 3–4 дБ в ближнем поле	– простота конструкции; – снижение амплитуды акустического шума в низкочастотной области; – без изменений массы двигателя	– рост высокочастотного шума; – 1–2 % потери тяги двигателя; – зависимость эффективности шевронов и потери тяги от угла заглубления; – возможное ухудшение характеристик двигателя на крейсерском режиме полета
Микроструи вблизи среза сопла	1. Массовый расход через микроструи 2. Отношение давлений 3. Отношение давлений воздуха на входе и выходе микросопла 4. Степень нерасчетности струи 5. Геометрическое число Маха 6. Скорость струи	1–2 дБ в среднем	– снижение суммарного уровня шума; – сохранение тяги двигателя; – возможность гибкого управления	– сложность конструкции; – отсутствие снижения суммарного шума для дозвуковых струй; – рост высокочастотного шума
Плазменные актуаторы	1. Скорость струи 2. Частота модуляции 3. Фаза колебаний 4. Амплитуда колебаний 5. Число Струхаля	1,3 дБ в среднем	– интеграция в поверхность; – отсутствие подвижных частей; – сохранение тяги двигателя; – возможность гибкого управления; – низкая инерционность; – возможность расположения на тонких поверхностях	– наличие эффекта от ПА только при высокочастотном возбуждении струи; – необходимость системы с обратной связью, с возможностью быстрого регулирования амплитуды, частоты и фазы искусственных возмущений
Многотрубчатый насадок	1. Диаметр трубок 2. Расстояние между трубками 3. Скорость струи 4. Температура потока 5. Количество трубок насадка 6. Отношение площадей насадка и среза исходного сопла	8 дБ в среднем	– укорочение области наиболее интенсивного излучения звука; – снижение шума на низких частотах; – эффект экранирования шума внутренних струй на начальном участке	– рост высокочастотного шума; – значительные потери тяги; – большой вес

Продолжение таблицы

Методы воздействия	Характеристики	Снижение шума	Преимущества	Недостатки
Сетчатый экран перпендикулярно истечению струи 	1. Площадь проходного сечения экрана 2. Геометрические параметры экрана 3. Расстояние от экрана до среза сопла 4. Скорость струи	5 дБ в среднем	– снижение шума на низких частотах	– усиление шума на высоких частотах, обусловленного шумом обтекания остова сетчатого экрана; – более эффективно в сочетании с другими методами борьбы с шумом; – приводит к потерям импульса турбулентной струи
Изменение формы сопла (щелевидное прямоугольное сопло) 	1. Размеры кромок сопла 2. Скорость струи 3. Геометрическое число Маха 4. Число Струхаля 5. Пространственная ориентация кромок сопла (угол наклона к горизонтали)	3–4 дБ в среднем	– интенсивность шума в два раза ниже, чем у осесимметричной струи	– протяженность зоны смешения перпендикулярно потоку больше; – рост высокочастотного шума; – при малых числах Маха возможно увеличение шума струи; – поверхность взаимодействия струи со стенками сопла больше
Экранирование шума струи вторичным газовым потоком 	1. Толщина газового слоя 2. Скорость газового потока 3. Скорость струи 4. Температура газового слоя 5. Угол падения звуковой волны 6. Плотность среды 7. Расположение газового слоя 8. Форма сечения газового слоя	5–7 дБ	– возможность экранирования шума в определенном направлении; – снижение шума на высоких частотах; – снижение шума в области углов наблюдения, соответствующих максимальной интенсивности излучения	– снижение шума за газовым слоем сопровождается увеличением шума с противоположной стороны
Эжекторное шумоглушащее сопло с многоэлементным насадком 	1. Геометрические параметры эжектора 2. Площадь поперечного сечения сопла 3. Скорость струи 4. Количество элементов насадка 5. Температура потока	10 дБ в среднем	– возможно дополнительное снижение шума за счет применения ЗПК на внутренних поверхностях эжекторных сопел; – снижение шума в области углов наблюдения, соответствующих максимальной интенсивности излучения; – снижение шума на низких частотах	– сложность конструкции; – появление дополнительного высокочастотного «лепесткового шума»; – большой вес; – конструктивные ограничения на длину эжектора и его площадь; – значительные потери тяги

Окончание таблицы

Методы воздействия	Характеристики	Снижение шума	Преимущества	Недостатки
Акустическое воздействие 	1. Частота звуковых возмущений 2. Скорость струи 3. Расстояние от излучателя до кромки сопла 4. Диаметр выходного сечения сопла 5. Перепад давлений на сопле	2–3 дБ в среднем	– при высокочастотном воздействии происходит широкополосное снижение шума	– при низкочастотном воздействии происходит широкополосное усиление шума; – сложность конструкции
Экранирование шума струи 	1. Угол наклона экранирующей поверхности к оси струи 2. Расстояние от оси струи до экрана 3. Толщина пластины (экрана) 4. Плотность материала 5. Скорость струи 6. Давление среды	до 3,5 дБ	– отсутствие потерь тяги; – отсутствие увеличения веса двигателя; – снижение шума на средних и высоких частотах	– наличие экрана может как снизить, так и усилить шум струи; – усиление шума на низких частотах

Для проведения данных исследований в лабораторных условиях необходимо специальное помещение, в котором звук будет распространяться как в свободном поле, не претерпевая отражения от стен, – акустическая заглушенная камера. Кроме того, камера должна быть снабжена установкой, способной генерировать струйное течение в неподвижную среду (затопленная струя) или в подвижную (спутный поток). В России на данный момент имеется всего две подобные установки: заглушенная камера АК-2 Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского [25], созданная еще в 70-х гг. прошлого века, и заглушенная камера с одноконтурной дозвуковой струей, созданная в 2014–2015 гг. в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) [26]. Камера АК-2 имеет спутный поток и двухконтурную струю и может реализовывать сверхзвуковые режимы [25]. Камера ПНИПУ имеет съемное напольное покрытие, что может быть использовано для отработки методик измерений на двигательном стенде, где присутствует жесткий пол, и для исследований с габаритными тяжелыми установками [27, 28]. Также заглушенная камера ПНИПУ оборудована генератором вихревых колец, что позволяет исследовать еще один вид турбулентных течений – вихревые кольца [29]. Данное обстоятельство делает камеру ПНИПУ уникальной.

В целом можно отметить, что большинство представленных в таблице методов борьбы с шумом струй, по сути, реализовали свой возможный максимум в снижении шума «чистой» струи. Однако степень эффективности некоторых методов для разных ситуаций продолжает исследоваться. К таковым, например, относится экранирование.

Также остается открытым вопрос применения данных методов к подавлению относительно мало исследованных источников шума, вызванных, например, модификацией узлов планера летательного аппарата. Повышение степени двухконтурности современного турбореактивного двигателя и увеличение его внешнего диаметра заставило конструкторов приближать двигатель к крылу, что обусловило возникновение шума взаимодействия струи двигателя с закрылками. Насколько будут эффективны в этом случае уже известные методы подавления шума струи (см. таблицу), будет установлено после проведения новых исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по договору № 14.Z50.31.0032.

Библиографический список

1. Кузнецов В.А., Мунин А.Г., Самохин В.Ф. «Зеленый» самолет // Наука и жизнь. – 2009. – № 3. – С. 22–27.

2. Копьев В.Ф., Мунин А.Г., Остриков Н.Н. Проблемы создания перспективных магистральных самолетов, способных удовлетворять нормам ИКАО по шуму на местности // Труды ЦАГИ. – 2014. – Вып. 2739. – С. 3–13.

3. Халецкий Ю.Д. ИКАО: новый стандарт на шум самолетов гражданской авиации // Двигатель. – 2014. – № 2(92). – С. 8–11.

4. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies // Journal Aerospace Lab. – 2014. – Iss. 7. – P. 1–15.

5. Задняя кромка для двигателя летательного аппарата, оснащенная подвижными шевронными элементами, и гондола летательного аппарата, снабженная такой задней кромкой: пат. 2492337 Рос. Федерация: МПК F02K 1/46 / Герен Ф.; заявитель и патентообладатель «Эрсель». – № 2010139205/06; заявл. 10.04.2012; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. – 11 с.

6. Противошумовой шеврон для сопла, а также сопло и турбореактивный двигатель, оснащенные таким шевроном: пат. 2466290 Рос. Федерация: МПК F02K 1/48 / Силла А.А., Юбер Ж., Пелагатти О., Пра Д., Дебатин К.; заявитель и патентообладатель «Эрбюс Операсьон». – № 2010109411/06; заявл. 20.09.2011; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31. – 12 с.

7. Исследование характеристик сопла ТРДД с регулируемыми шевронами / А.А. Алексенцев, Д.Б. Бекурин, Е.В. Власов [и др.] // Ученые записи ЦАГИ. – 2009. – Т. XL, № 6. – С. 14–21.

8. Любимов Д.А. Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения: автореф. дис. … д-ра. физ.-мат. наук. – М., 2014. – 40 с.

9. 3D numerical studies on jets acoustic characteristics of chevron nozzles for aerospace applications / R. Kanmaniraja, R. Freshipali, J. Abdullah [et al.] // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2014. – Vol. 8. – P. 1510–1516.

10. Макаренко Т.М., Халилулина Д.И. Турбулентные характеристики шевронных сопел // Тез. докл. третьей открытой всерос. конф. по аэроакустике, 1–3 октября 2013 г. – Звенигород, 2013. – С. 160–162.

11. Губанов Д.А., Запрягаев В.И., Киселев Н.П. Структура течения сверхзвуковой недорасширенной струи с вдувом микроструй // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Сер.: Физика. – 2013. – Т. 8, вып. 1. – С. 44–55.

12. Губанов Д.А. Влияние микроструй на структуру и акустическое излучение сверхзвуковой недорасширенной струи: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2014. – 140 с.

13. Pul R. Dielectric barrier discharge plasma actuators for unsteady aerodynamic load control / Delft University of Technology. – Delft, 2013. – 110 p.

14. Редчиц Д.А. Моделирование воздействия диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора на находящийся в покое воздух // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2012. – Вып. 18. – С. 161–174.

15. Управление шумом струи с помощью плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда / В.Ф. Копьев, В.А. Битюрин, И.В. Беляев [и др.] // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 4. – С. 473–481.

16. Кузнецов В.М. Основы теории шума турбулентных струй. – М.: Физматлит, 2008. – 240 с.

17. Мунин А.Г., Науменко З.Н. Звуковая мощность, создаваемая участками дозвуковой струи // Ученые записки ЦАГИ. – 1970. – Т. 1, № 5. – С. 29–38.

18. Кузнецов В.М. Эффективность методов снижения шума реактивных струй двигателей пассажирских самолетов // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 1. – С. 91–102.

19. Авиационная акустика. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов / А.Г. Мунин, В.Ф. Самохин, Р.А. Шипов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 243 с.

20. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. – М.: Физматлит, 2001. – 204 с.

21. Пимштейн В.Г. О скорости конвекции возмущений в турбулентных струях при аэроакустических взаимодействиях // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48, № 5. – С. 21–25.

22. Экспериментальные исследования по управлению волнами неустойчивости в турбулентной струе / В.Ф. Копьев, И.В. Беляев, Г.А. Фараносов, В.А. Копьев, М.Ю. Зайцев // Труды ЦАГИ. – 2014. – Вып. 2739. – С. 44–57.

23. Papamoschou D., Mayoral S. Jet noise shielding for advanced hybrid wing-body configurations // AIAA Paper. – 2011. – AIAA-2011-912.

24. Расчетное исследование ожидаемых уровней шума на местности самолета СДС с двигателями ПД-14С по различным методикам, с использованием экспериментальных данных, полученных для модели струй различной геометрии / В.Ф. Копьев, Н.Н. Остриков, И.В. Беляев, Р.К. Каравосов [и др.] // Тез. докл. четвертой открытой всерос. конф. по аэроакустике, 29 сентября – 1 октября 2015 г. – Звенигород, 2015. – С. 53–55.

25. Акустическая камера АК-2 [Электронный ресурс] // ЦАГИ. – URL: http://www.tsagi.ru/experimental_base/akusticheskaya-kamera-ak-2 (дата обращения: 10.01.2017).

26. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик / В.Ф. Копьев, В.В. Пальчиковский, И.В. Беляев, Ю.В. Берсенев, С.Ю. Макашов, И.В. Храмцов, И.А. Корин, Е.В. Сорокин, О.Ю. Кустов // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 1. – С. 114–126.

27. Применение метода плоского бимформинга к идентификации вращающихся звуковых мод / Ю.В. Берсенев, Т.А. Вискова, И.В. Беляев, В.В. Пальчиковский, О.Ю. Кустов, В.В. Ершов, Р.В. Бурдаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 26–38.

28. Идентификация вращающихся звуковых мод в канале воздухозаборника авиационного двигателя с помощью кольцевой решетки микрофонов / Ю.В. Берсенев, Т.А. Вискова, И.В. Беляев, В.В. Пальчиковский, Р.В. Бурдаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 2(45). – С. 114–132.

29. Экспериментальное исследование шума турбулентных вихревых колец в заглушенной камере / В.Ф. Копьев, М.Ю. Зайцев, В.В. Пальчиковский, И.В. Храмцов, Ю.В. Берсенев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 2(45). – С. 133–151.

References

1. Kuznetsov V.A., Munin A.G., Samokhin V.F. «Zelenyy» samolet [Clear-of-environmental-noise aircraft]. *Nauka i zhizn*, 2009, no. 3, pp. 22-27.

2. Kopiev V.F., Munin A.G., Ostrikov N.N. Problemy sozdaniya perspektivnykh magistralnykh samoletov, sposobnykh udovletvoryat normam IKAO po shumu na mestnosti [Problems of creation of future mainline aircrafts satisfying ICAO standards on environmental noise]. *Trudy TsAGI*, 2014, iss. 2739, pp. 3-13.

3. Khaletskiy Yu.D. IKAO: novyy standart na shum samoletov grazhdanskoy aviatsii [ICAO: new standard for passenger aircraft noise]. *Dvigatel*, 2014, no. 2 (92), pp. 8-11.

4. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies // Journal Aerospace Lab. 2014. Iss. 7.

5. Geren F. Zadnyaya kromka dlya dvigatelya letatelnogo apparata, osnashchennaya podvizhnymi shevronnymi elementami, i gondola letatelnogo apparata, snabzhennaya takoy zadney kromkoy [Rear edge for aircraft engine equipped with movable chevron elements, and aircraft car equipped with such rear edge]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2492337 (2013).

6. Silla A.A., Yuber Zh, Pelagatti O., Pra D., Debatin K. Protivoshumovoy shevron dlya sopla, a takzhe soplo i turboreaktivnyy dvigatel, osnashchennye takim shevronom [Noise-protection chevron for nozzle, as well as nozzle and jet turbine engine, which are equipped with such chevron]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2466290 (2012).

7. Aleksentsev A.A., Bekurin D.B., Vlasov E.V. et al. Issledovanie kharakteristik sopla TRDD s reguliruemymi shevronami [Investigation of nozzle characteristics of turbojet bypass engine with active chevrons]. *Uchenye zapisi TsAGI*, 2009, vol. XL, no. 6, pp. 14-21.

8. Lyubimov D.A. Analiz turbulentnykh struynykh i otryvnykh techeniy v elementakh TRD kombinirovannymi RANS/LES-metodami vysokogo razresheniya [Analysis of turbulent structures and detached flows in elements of turbojet engine by combined RANS/LES methods with fine grids]. Abstract of Doctor’s degree dissertation. Moscow, 2014, 40 p.

9. Kanmaniraja R., Freshipali R., Abdullah J. et al. 3D numerical studies on jets acoustic characteristics of chevron nozzles for aerospace applications. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2014, vol. 8, pp. 1510-1516.

10. Makarenko T.M., Khalilulina D.I. Turbulentnye kharakteristiki shevronnykh sopel [Turbulent characteristics of chevron nozzles]. *Tezisy dokladov tretey otkrytoy vserossiyskoy konferentsii po aeroakustike*, 1-3 October 2013, Zvenigorod, pp. 160-162.

11. Gubanov D.A., Zapryagaev V.I., Kiselev N.P. Struktura techeniya sverkhzvukovoy nedorasshirennoy strui s vduvom mikrostruy [Flow structure of supersonic underexpanded jet with microjets injection]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika*, 2013, vol. 8, iss. 1, pp. 44-55.

12. Gubanov D.A. Vliyanie mikrostruy na strukturu i akusticheskoe izluchenie sverkhzvukovoy nedorasshirennoy strui [Influence of microjets on structure and acoustical radiation of supersonic underexpanded jets]. Ph. D. thesis. Novosibirsk, 2014.

13. Pul R. Dielectric barrier discharge plasma actuators for unsteady aerodynamic load control. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2013, 110 p.

14. Redchits D.A. Modelirovanie vozdeystviya dielektricheskogo barernogo razryada pri rabote plazmennogo aktuatora na nakhodyashchiysya v pokoe vozdukh [Modeling dielectric barrier discharge influence on quiescent air when operating plasma actuator]. *Institut transportnykh sistem i tekhnologiy NAN Ukrainy «TRANSMAG»*, 2012, iss. 18, pp. 161-174.

15. Kopiev V.F., Bityurin V.A., Belyaev I.V. et al. Jet noise control using the dielectric barrier discharge plasma actuators. *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 434-441.

16. Kuznetsov V.M. Osnovy teorii shuma turbulentnykh struy [Fundamentals of turbulent jet noise]. Moscow, FIZMATLIT, 2008, 240 p.

17. Munin A.G., Naumenko Z.N. Zvukovaya moshchnost, sozdavaemaya uchastkami dozvukovoy strui [Sound power created by zones of subsonic jet]. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1970, vol. 1, no. 5, pp. 29-38.

18. Kuznetsov V.M. The way to decrease efficiently the noises generated by the jets of passenger aircrafts. *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 85-95.

19. Munin A.G., Samokhin V.F., Shipov R.A. et al. Aviatsionnaya akustika, ch.1. Shum na mestnosti dozvukovykh passazhirskikh samoletov i vertoletov [Aeronautical acoustics. Part 1. Environmental noise of subsonic passenger aircrafts and helicopters]. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 243 p.

20. Ginevskiy A.S., Vlasov E.V., Karavosov R.K. Akusticheskoe upravlenie turbulentnymi struyami [Control of turbulent jets by acoustical action]. Moscow, FIZMATLIT, 2001, 204 p.

21. Pimshtein V.G. Disturbance convection velocity in turbulent jets under aeroacoustic excitation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 636-640.

22. Kopiev V.F., Belyaev I.V., Faranosov G.A., Kopiev V.A., Zaytsev M.Yu. Eksperimentalnye issledovaniya po upravleniyu volnami neustoychivosti v turbulentnoy strue [Experimental investigations on control of instability waves in turbulent jet]. *Trudy TsAGI*, 2014, iss. 2739, pp. 44-57.

23. Papamoschou D., Mayoral S. Jet noise shielding for advanced hybrid wing-body configurations. *AIAA Paper*, 2011, AIAA-2011-912.

24. Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Belyaev I.V., Karavosov R.K. et al. Raschetnoe issledovanie ozhidaemykh urovney shuma na mestnosti samoleta SDS s dvigatelyami PD-14S po razlichnym metodikam, s ispolzovaniem eksperimentalnykh dannykh, poluchennykh dlya modeli struy razlichnoy geometrii [Calculation of expected levels of environmental noise of SDS plane with PD-14S engine based on approaches with experimental data obtained for jet model with different geometry]. *Tezisy dokladov chetvertoy otkrytoy vserossiyskoy konferentsii po aeroakustike*, 29 September – 1 October 2015, Zvenigorod, pp. 53-55.

25. Akusticheskaya kamera AK-2 [Acoustical chamber AC-2]. Available at: http://www.tsagi.ru/experimental_base/akusticheskaya-kamera-ak-2/ (accessed 10 January 2017).

26. Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Yu.V. et al. Construction of an anechoic chamber for aeroacoustic experiments and examination of its acoustic parameters. *Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, no. 1, pp. 113-124.

27. Bersenev Yu.V., Viskova T.A., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V. et al. Primenenie metoda ploskogo bimforminga k identifikatsii vrashchayushchikhsya zvukovykh mod [Application of planar beamforming method to identification of spinning acoustic modes]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 26-38.

28. Bersenev Yu.V., Viskova T.A., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V., Burdakov R.V. Identifikatsiya vrashchayushchikhsya zvukovykh mod v kanale vozdukhozabornika aviatsionnogo dvigatelya s pomoshchyu

koltsevoy reshetki mikrofonov [Identification of spinning acoustic modes in aeroengine inLET duct with circular microphone array]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2016, no. 2 (45), pp. 114-132.

29. Kopiev V.F., Zaytsev M.Yu., Palchikovskiy V.V., Khramtsov I.V., Bersenev Yu.V. Eksperimentalnoe issledovanie shuma turbulentnykh vikhrevykh kolets v zaglushennoy kamere [Experimental investigation of turbulent vortex ring noise in anechoic chamber]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2016, no. 2 (45), pp. 133-151.

Об авторах

Рыбинская Любовь Алексеевна (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа, аспирантка кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 15, e-mail: letoinf@gmail.com).

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 15, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Кычкин Владимир Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и технологические машины» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 15).

About the authors

Lyubov A. Rybinskaya (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher of Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Postgraduate Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: letoinf@gmail.com).

Roman V. Bulbovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Vladimir I. Kychkin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Av., Perm, 614990, Russian Federation).

Получено 30.01.2017