

УДК 621.431.75+502.6

О НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

© 2012 Б. С. Замтфорт

Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ

Проведено сравнение и выполнен анализ акустических характеристик двигателя с открытым ротором и ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности. Рассмотрено несколько экспериментальных работ по снижению тонального шума открытого ротора.

Двигатель с открытым ротором, ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности, акустические характеристики, лопасти с шевронной задней кромкой.

В настоящее время проблема экологической безопасности является второй по актуальности (на первом месте находится безопасность полётов). Международная организация гражданской авиации (ИКАО) проводит политику по постоянному снижению вредного экологического воздействия воздушных судов на окружающую среду. Следует отметить, что вводимые ИКАО ограничения являются компромиссом между желаемым ужесточением требований по экологии и техническими и экономическими возможностями по их реализации. Как известно, нормативы ИКАО по шуму самолётов на местности сформулированы в первом томе «Авиационный шум», а требования по эмиссии изложены во втором томе «Эмиссия авиационных двигателей» Приложения 16 к конвенции ИКАО. Указанные выше нормативы постоянно пересматриваются (ужесточаются) по мере развития авиационной техники.

Так, в 2010г. на 37 Ассамблее ИКАО были утверждены нормы по снижению уровней шума на местности на 20-25 EPN дБ к 2028г, по снижению уровня шума в салоне до 75 -70 дБА к 2020 – 2025гг. и уменьшению эмиссии NOx на 45% и 60% к 2020г. и к 2030г., соответственно. На этой же Ассамблее было принято решение о создании третьего тома Приложения 16 о нормировании топливной эффективности воздушных судов, основанного на критерии расхода топлива на пассажирокилометр, который должен быть принят на 38 Ассамблее в 2013г. Это позволит снизить выбросы парниковых газов (где CO₂ – основная составляющая). В связи с вышеизложенным особенно важным является комплексная оценка вредного воздействия гражданской авиации на окружающую среду: шум, эмиссия и парниковые га-

зы. Однако, поскольку норматива на парниковые газы пока не создано, то ограничимся анализом первых двух факторов – шума и эмиссии.

Рассмотрим два, по-видимому, магистральных направления развития мирового пассажирского двигателестроения, а именно создание двигателей со сверхбольшой степенью двухконтурности и двигателей с открытым ротором. Принципиальная схема двигателя со сверхбольшой степенью двухконтурности не отличается от схемы ТРДД с большой степенью двухконтурности. Общий вид двигателя с открытым ротором показан на рис.1.

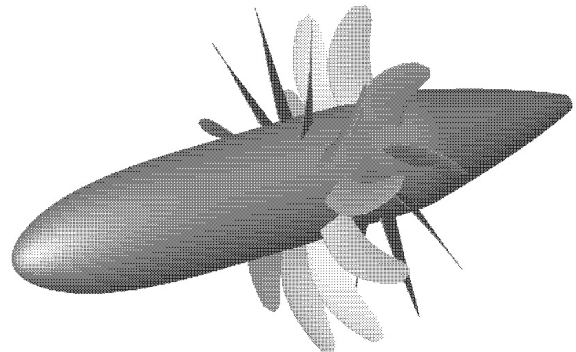


Рис.1. Общий вид двигателя с открытым ротором

Благодаря более высокому КПД двигателя с открытым ротором будут потреблять меньше топлива примерно на 30% и создавать меньший объём вредных выбросов в атмосферу, чем традиционные ТРДД. Это позволит, по зарубежным оценкам, существенно повысить топливную эффективность самолётов с такими двигателями, а следовательно, снизить эмиссию и выброс парниковых газов.

Первым двигателем с открытым ротором был GE-36 (фирма General Electric), созданный ещё в середине 80-х годов. Для радикального повышения степени двухконтур-

ности вентилятор значительно увеличили в диаметре, а ради уменьшения лобового сопротивления и снижения веса с него сняли кольцевой обтекатель. Следствием этого и стало значительное увеличение шума.

В настоящее время фирма Rolls-Royce проводит испытания прототипа двигателя с открытым ротором Rig 145 (в масштабе 1: 6). Планируется создать три прототипа: два – для стендовых испытаний, а один – для лётных. Начало серийного производства двигателя с открытым ротором запланировано на 2022-2025гг.

CFM International - совместное предприятие GE и французской промышленной группы SAFRAN (фирма Snecma входит в эту группу) - в течение нескольких последних лет также проводит испытания двигателя с открытым ротором.

Фирма Pratt&Whitney считает:

1) конкурентоспособный двигатель с открытым ротором находится пока на этапе предэскизного проектирования и создания экспериментальных образцов;

2) уровни шума двигателя с открытым ротором будут намного выше, чем у ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности.

В то же время фирма Pratt&Whitney утверждает, что удельный расход топлива у ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности, оснащённого редуктором, может быть доведён до уровня удельного расхода топлива двигателя с открытым ротором, но при этом ТРДД будет иметь значительно меньшие габариты и меньшие уровни шума. Европейский союз профинансировал проекты по программе «Чистое небо», ставя при этом задачу снижения уровня шума двигателей с открытым ротором на 15 дБ. Имеющиеся на сегодня технологии позволяют снизить уровни шума максимум на 5-10 дБ. Будущее двигателей с открытым ротором зависит как от возможностей снижения уровней шума, генерируемых двигателем с открытым ротором, так и от выбора фирмами Boeing и Airbus пути дальнейшего развития узкофюзеляжного модельного ряда самолётов или с ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности, или с двигателем с открытым ротором.

Поэтому проблема акустики для двигателя с открытым ротором является первостепенной. Однако при более подробном рассмотрении проблемы шума, генерируемого такими двигателями, становится ясно, что их внедрение приведёт к серьёзным проблемам не только по шуму на местности, но и по шуму в салоне. Остановимся сначала на шуме на местности: ясно, что переход на самолёты с открытым ротором приведёт к снижению оптимальной по эффективности перевозок скорости полёта самолёта с $M=0,95$ (для $m=4$ - степень двухконтурности) или $M=0,85$ (для $m=6$) до $M=0,75$ (для самолётов с открытым ротором), т.е. на 12-20%. Следовательно, при той же пассажироместимости самолётов потребуется (даже без учёта роста пассажиропотока по разным оценкам от 1% до 5% в год) или на 12-20% увеличить парк самолётов, или частоту их полётов, или частично применить оба мероприятия, что, в свою очередь, приведёт к росту зашумлённости в окрестностях аэропортов из-за увеличения числа взлётов/посадок (даже при равном акустическом качестве самолётов с ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности и самолётов, имеющих двигатели с открытым ротором). Однако при более подробном рассмотрении акустических характеристик этих самолётов (по шуму на местности) сразу выясняется, что самолёты с ТРДД с большой или сверхбольшой степенью двухконтурности имеют целый ряд явных преимуществ перед самолётами с открытым ротором. Так, в спектрах шума самолётов с открытым ротором кроме всех составляющих шума, имеющихся в спектрах шума самолётов с ТРДД с большой степенью двухконтурности (широкополосный шум, шум на частоте следования лопаток вентилятора и её гармонике, шум ударных волн при транс- и сверхзвуковых скоростях вращения), добавляются мощные тональные составляющие на комбинационных частотах (комбинация частот следования лопастей первого и второго роторов). На рис.2 представлен узкополосный спектр шума двигателя с открытым ротором.

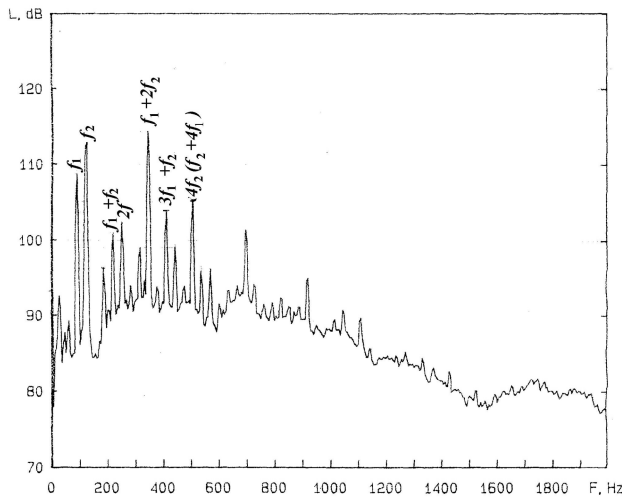


Рис.2. Типичный спектр шума двигателя с открытым ротором

Хорошо видны пики тонального шума на частотах, равных сумме частот следования лопаток первого и второго роторов $f_{с1}+f_{с2}$; частоте следования лопаток первого ротора и удвоенной частоте следования лопаток второго ротора $f_{с1}+2f_{с2}$; утроенной частоте следования лопаток первого ротора и частоте следования лопаток второго ротора $3f_{с1}+f_{с2}$; учетверённой частоте следования лопаток второго ротора $4f_{с2}$ или учетверённой частоте следования лопаток первого ротора и частоте следования лопаток второго ротора $4f_{с1}+2f_{с2}$ и т.д. Уровни шума на этих частотах равны, а на некоторых направлениях и значительно выше, чем уровни шума на частоте следования лопастей 1-го и 2-го рядов ротора. Все эти пики тонального шума на реальном двигателе генерируются на очень низких частотах.

Например, $f_{с1}$ и $f_{с2}$ примерно равны 100 - 130 Гц, а $f_{с1}+f_{с2} \sim 230$ Гц и т.д. Для двигателя со сверхбольшой степенью двухконтурности из-за существенно больших окружных скоростей и чисел лопаток рабочего колеса $f_{с1} \sim 2000$ Гц. Одновременно следует учесть, что коэффициент затухания звука в воздухе на частоте 100 Гц равен 0,05 дБ/100м, а на частоте 2000 Гц - 1,2дБ/100м. Следовательно, на расстоянии 700м (примерная высота пролёта самолёта над контрольной точкой при наборе высоты) только разница в величинах затухания составит ~ 8 дБ, не говоря уже о значительном превышении уровней тонального шума двигателя с открытым ротором над уровнями тонального

шума двигателя ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности.

В экспериментальной работе [1] изучено влияние шевронной задней кромки на tonальный шум, генерируемый открытым ротором.

Тональный шум открытого ротора может быть разделён на собственный шум и шум взаимодействия. Шум, обусловленный взаимодействием следов от переднего ротора с лопастями заднего ротора, – шум взаимодействия периферийных вихрей. Создание шевронов на задней кромке будет улучшать смещение следов и позволит снизить тональный шум взаимодействия. На рис.3 представлена принципиальная схема следового взаимодействия первого и второго роторов.

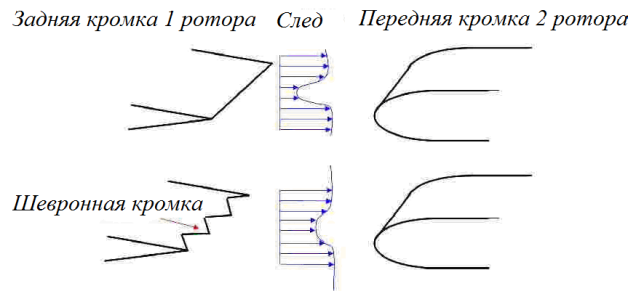


Рис.3. Схема следового взаимодействия первого и второго роторов

По трёхмерной расчётной модели были рассчитаны три варианта задней шевронной кромки. На рис. 4 представлены исходный профиль и три варианта профилей с задней шевронной кромкой. Влияние задней шевронной кромки проявляется следующим образом: на низких частотах происходит перераспределение звуковой энергии по различным направлениям диаграммы направленности, а на высоких частотах наблюдается систематическое снижение уровня звукового давления.

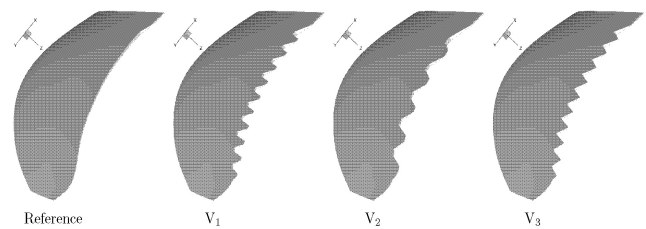


Рис.4. Исходная задняя кромка и три варианта шевронной кромки

Необходимо обратить внимание на очень сложный и разнообразный характер

диаграмм направленности (рис. 5) пиков тонального шума. На рис.5 представлены диаграммы направленности только для четырёх пиков тонального шума: 1-й – $f_{сл1}+4f_{сл2}=817\text{Гц}$; 2-й – $2f_{сл1}+3f_{сл2}=852\text{Гц}$; 3-й – $3f_{сл1}+2f_{сл2}=887\text{Гц}$; 4-й – $4f_{сл1}+f_{сл2}=921\text{Гц}$.

Эти пики расположены в узкой полосе частот – 104Гц и имеют совершенно не похожие, а 2-й и 3-й пики ещё и очень сложные диаграммы направленности. Всё это говорит о больших трудностях, связанных с задачей глушения такого источника шума.

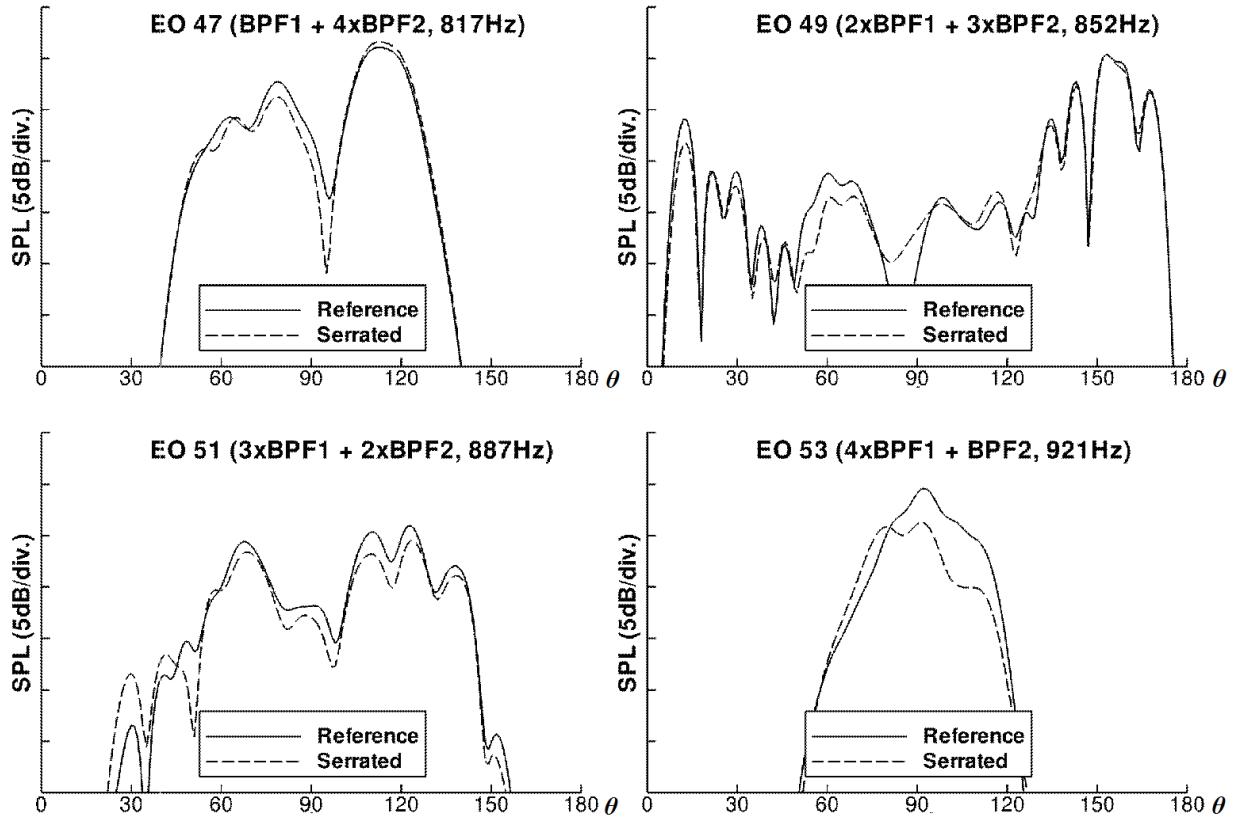


Рис.5. Диаграммы направленности различных пиков тонального шума

В работе [2] проведена экспериментальная проверка идеи снижения тонального шума взаимодействия путём создания «лопасти низкого шума» для открытого ротора. На основе численных расчётных методов были выбраны размеры и место расположения перфорации в задней части лопастей первого ротора. Так, у «лопасти низкого шума» на 50% длины задней кромки от периферии и 33% по ширине размещалась перфорированная поверхность со степенью перфорации 22%. На рис. 6 представлен общий вид лопасти с перфорацией.

Были исследованы 4 варианта расположения перфорации: 1-с обеих сторон лопасти; 2- на поверхности разрежения; 3- на поверхности давления; 4- на поверхности давления + вспененный материал в полости.

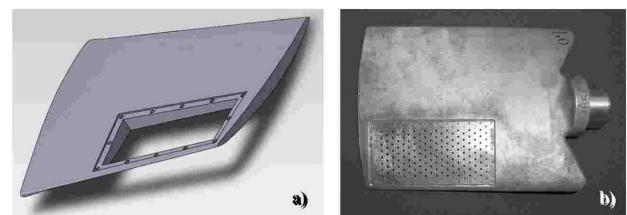


Рис. 6. Измененный (а) участок лопасти ротора и один из четырёх вариантов лопасти (б)

Наиболее эффективными оказались варианты 3 и 4. Так величина снижения тонального шума взаимодействия открытого ротора на отдельных гармониках колебалась от 1,5 до 8,5 дБ. При проектировании имеется возможность изменять степень перфорации и диаметр отверстий в лопасти, а также пористость находящегося в ней материала – т.е. величину сопротивления продуванию. Таким образом, у варианта 4 есть резервы по оптимизации этих параметров с целью дальнейшего снижения уровня тонального шума.

Целью работы [3] было показать эффективность методологии аэродинамической и акустической оптимизации открытого ротора встречного вращения. Основные усилия были направлены на повышение коэффициента полезного действия работы открытого ротора как движителя на режиме набора высоты и одновременного улучшения его акустических характеристик при взлёте. Эти две основные задачи были успешно решены в совместном эксперименте (DLR) немецкого аэрокосмического центра и ЦАГИ. Испытания модели открытого ротора были проведены в аэродинамической трубе ЦАГИ. Основным источником улучшения акустических характеристик также связан с идеей уменьшения неравномерности скорости в следе за первой ступенью открытого ротора. Уменьшение неравномерности скорости в следе дает снижение уровня шума при взлёте в среднем на 3,2 дБ для оптимизированного варианта ротора (рис. 7).

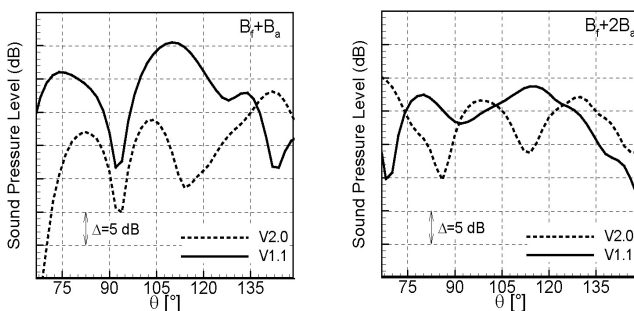


Рис. 7. Сравнение уровней звукового давления в дальнем звуковом поле для исходного и оптимизированного вариантов открытого ротора

Суммируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что двигатели с открытым ротором являются очень сложным и мощным источником шума, в котором доминирует именно открытый ротор. Пока совершенно не ясно, можно ли снизить его шум до уровня требований, которые будут предъявляться к самолётам в 2020-2030гг. Так как двигатели с открытым ротором предполагается использовать на узкофюзеляжных самолётах Boeing и Airbus, то следует иметь в виду, что эффективность силовой установки с открытым ротором достигается при диаметре ротора $\sim 4,3 - 5,0$ м, т.е. примерно вдвое больше, чем диаметр ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности. Таким образом, двигатель необходимо устанавливать на значительно большем расстоянии от кры-

ла или фюзеляжа, что создаёт дополнительную аэродинамическую проблему компоновки такой силовой установки на самолёте. Одна из возможных компоновок двигателя с открытым ротором на самолёте показана на рис. 8.

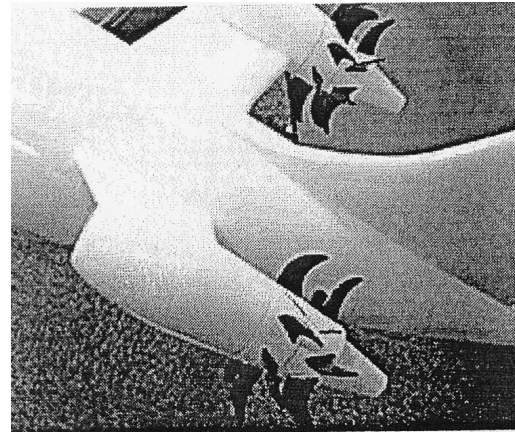


Рис. 8. Вариант хвостовой компоновки двигателя с открытым ротором (толкающий вариант)

Отметим также, что у двигателя со сверхбольшой степенью двухконтурности имеется еще одно серьёзное преимущество перед двигателем с открытым ротором. Заметный вклад в снижение уровня излучаемого им шума будет вносить оболочка наружного контура двигателя. Оболочка - это экран, препятствующий прямому излучению звука, как элемент конструкции двигателя / самолёта. В ней размещаются звукопоглощающие облицовки, также снижающие уровни шума как путём поглощения акустической энергии, так и путём перераспределения энергии по модам колебаний при правильном проектировании ЗПК (из распространяющихся мод в нераспространяющиеся). При грамотном проектировании ЗПК можно сформировать оптимальную диаграмму направленности двигателя и т.д. Необходимо отметить и такую чрезвычайно важную функцию оболочки для сохранения жизнеспособности самолёта, как удержание части оторвавшейся лопатки. Самолёты с ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности могут иметь оптимальную по эффективности перевозок скорость полёта самолёта, близкую к $M=0,75$, но будут лишены всех вышеперечисленных акустических недостатков самолётов с открытым ротором. Более того, при наличии редукторной схемы ТРДД со сверхбольшой степенью двухконтурности выбираются оптимальные по шуму окружные скорости вентилятора и турбины, что позволяет одновременно улучшить

акустические характеристики двигателя в целом и снизить число ступеней турбины, а следовательно массу двигателя.

При рассмотрении ситуации с уровнями шума в кабине экипажа и пассажирском салоне становится ясно, что наличие множества пиков тонального шума в спектре двигателя с открытым ротором потребует (при их традиционной подкрыльевой компоновке) создания мощной звукоизолирующей конструкции фюзеляжа, что не может быть принято из-за увеличения массы самолёта. По-видимому, использование такого двигателя возможно только при хвостовой компоновке и толкающем открытом роторе. При этом в хвостовой части пассажирского салона необходимо предусмотреть звукоизолирующую переборку, чтобы получить допустимый уровень шума в салоне.

Качественный анализ показывает, что самолёты, оснащённые двигателем с открытым ротором, будут иметь хорошие эмиссионные характеристики и небольшие величины выбросов парниковых газов. В то же время выполнение требований по уровням шума на местности на 15-20 EPN дБ ниже норм

главы 4 Стандарта ИКАО будет для таких самолётов очень непростой задачей. Поэтому весьма актуальной является проблема правильной оценки всех преимуществ и недостатков обоих двигателей и выбора лучшего двигателя для гражданской авиации ближайшего будущего.

Библиографический список

1. Weckmuller, S.C. Guerin German Aerospace Center, Institute of Propulsion Technology. On the influence of trailing-edge serrations on open-rotor tonal noise [Text] / S.C. Weckmuller, AIAA.- 2012.- № 2124.
2. Bauer, M. EADS. An experimental study on a low noise blade concept for CROR [Text] / M.Bauer, D.Redmann, R.Pontgratz. AIAA – 2012. - № 2126.
3. Schnell, R. German Aerospace Center, Institute of Propulsion Technology. Aerodynamic and basic acoustic optimization of a contra-rotating open rotor with experimental verification [Text] / R. Schnell, J. Yin, S. Funke, H. Siller. AIAA. – 2012. - №2127.

ABOUT SOME DIRECTIONS IN DEVELOPMENT AVATION ENGINE BUILDINGS

© 2012 B. S. Zamtfort

Scientific research Moscow complex Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI)

Analysis of the acoustic characteristics of the engines with open rotor and turbofan engines shown what in engine noise with open rotor in addition to traditional component of the noise added tonal noise peaks at combination frequencies in low frequency part spectra. All of this creates many difficulties in the reduction the noise of aircrafts with this engines on the ground. Problem of choise engines for future aviation discussed.

Engine with open rotor, turbofan with super big bypass ratio, acoustics characteristics, blade with serrated trailing edge.

Информация об авторах

Замтфорт Борис Соломонович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий инженер, научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ. E-mail: bsz@inbox.ru. Область научных интересов: авиационная акустика (экспериментальные модельные и натурные исследования; построение расчётно-теоретических моделей, описывающих процессы генерации, излучения и распространения шума авиационных двигателей и самолётов; нормирование акустических характеристик).

Zamtfort Boris Solomonovich, candidate of science (engineering), senior scientific worker, leading engineer of scientific research Moscow complex Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). E-mail: bsz@inbox.ru. Area of research: aviation acoustic (experimental model and nature of investigation; development models of calculations noise of engines and aircrafts; rate setting of acoustic characteristics).