

УДК 534.83

СНИЖЕНИЕ ШУМА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУИ ДВИГАТЕЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЕТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО СОПЛА В ЗАГЛУШЕННОЙ КАМЕРЕ АК-2 ЦАГИ

© 2022 г. И. В. Беляев^{1,*}, В. С. Горбовской¹, А. В. Кажан¹, Г. А. Фараносов¹

Поступило 25.04.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принято к публикации 12.05.2022 г.

Шум струи, как ожидается, будет важным источником шума перспективного сверхзвукового гражданского самолета (СГС) на режимах взлета и набора высоты, так что разработка методов снижения шума струи СГС является необходимым условием обеспечения СГС норм по шуму на местности. В рамках исследований по снижению шума струи СГС были проведены акустические испытания маломасштабной модели плоского сопла типа “миксер-эжектор” с системой шумоглушения на режимах работы, соответствующих взлету и набору высоты, включая наличие спутного потока. Были получены спектральные характеристики и диаграммы направленности шума в дальнем поле для широкого диапазона азимутальных и полярных углов. Результаты проведенных измерений сравнивались с двумя базовыми вариантами: 1) одно круглое сопло с тем же перепадом давления и той же тягой, что и плоское сопло, 2) два одинаковых круглых сопла, с тем же перепадом давления и той же суммарной тягой, что и плоское сопло. Для эквивалентных струй, соответствующих этим двум базовым вариантам, на основе полуэмпирической методики ЦАГИ расчета шума струй был определен шум в дальнем поле. Сравнение с экспериментальными данными плоского сопла показало, что имеются диапазоны углов наблюдения и частот, где наблюдается снижение шума за счет применения плоского сопла по сравнению с эквивалентными круглыми струями, и диапазоны, где плоское сопло оказывается шумнее. Проведенный пересчет спектров на натурные масштабы и оценка шума СГС в метрике EPNL показали, что применение данного плоского сопла может приводить к интегральному эффекту снижения шума на местности по сравнению с круглыми соплами.

Ключевые слова: аэроакустика, шум струи, плоское сопло, шум на местности, снижение шума

DOI: 10.31857/S2686740022050029

ВВЕДЕНИЕ

Хотя наиболее узнаваемым эффектом воздействия сверхзвуковых гражданских самолетов (СГС) на окружающую среду является звуковой удар [1], обеспечение перспективными СГС приемлемых уровней шума на местности представляет собой важное условие возможности их эксплуатации и требует применения различных методов, подхо-

дов и технологий для снижения шума СГС в районе аэропорта.

Оценки шума для СГС первого поколения (Ту-144 и Конкорд) показывают, что для этих самолетов доминирующим источником шума на местности была реактивная струя [2, 3]. Несмотря на то что для силовых установок разрабатываемых проектов СГС следующего поколения скорости истечения струи на режимах взлета и посадки меньше, чем у Ту-144 и Конкорда, они все равно остаются достаточно высокими, так что шум струи представляет собой один из главных источников шума перспективных СГС. Как следствие, для СГС особую важность приобретают технологии снижения шума реактивных струй [3].

Одним из перспективных способов снижения шума высокоскоростных струй является применение сопел типа “миксер-эжектор” [4, 5]. В этом случае струя подсасывает поток из окружающего воздуха или из струи наружного контура, что при-

¹Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

*E-mail: ivan.belyaev@tsagi.ru

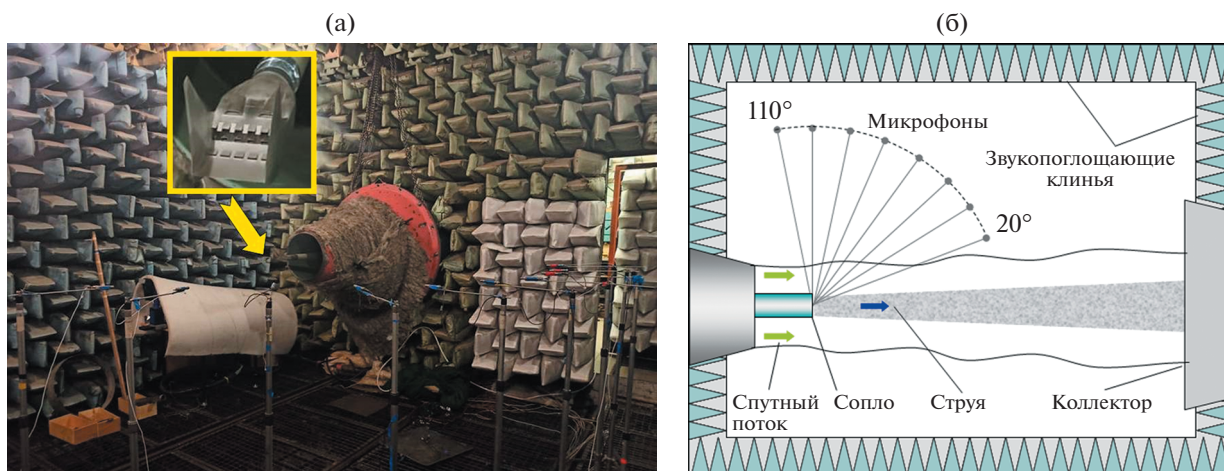


Рис. 1. а – Фотография плоского сопла с системой шумоглушения, установленного в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ, б – схема расположения микрофонов при испытаниях плоского сопла (вид сверху).

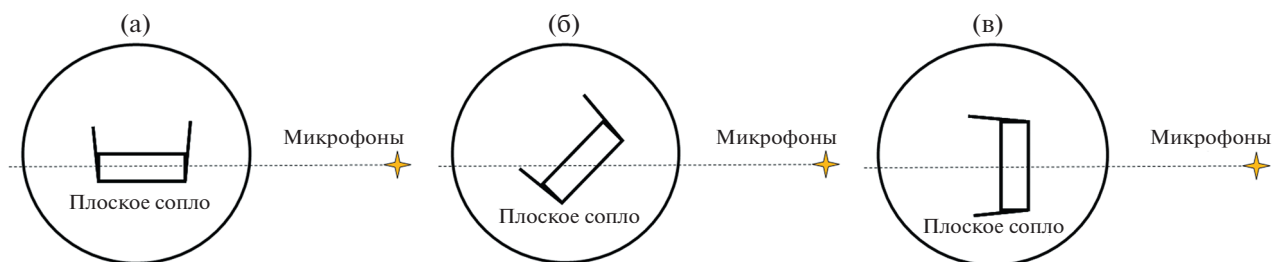


Рис. 2. Различные положения сопла, соответствующие азимутальному углу наблюдения ϑ : 0° (а), 45° (б) и 90° (в) (вид со стороны коллектора).

водит к увеличению массового расхода на выходе из эжектора и уменьшению соответствующей скорости по сравнению со скоростью только исходной струи. Эффективность такого устройства зависит от процесса турбулентного перемешивания, который, в свою очередь, зависит как от геометрических параметров сопла, так и от параметров потока. Использование на кромке сопла дополнительных устройств, таких как вихревые генераторы или гофры, может значительно улучшить процесс перемешивания и, как следствие, эффективность сопел типа “миксер-эжектор”.

В рамках данной работы было исследовано плоское сопло с системой шумоглушения, разработанное в ЦАГИ [6]. Задача исследования состояла в сравнении экспериментально измеренных значений шума струи, истекающей из такого сопла, с шумом эквивалентной круглой струи.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Акустические испытания плоского сопла проводили в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ (рис. 1а), позволяющей проводить испытания в заглушенных условиях для частот более 160 Гц. Шум струи

измерялся с помощью 10 микрофонов 1/2" Briel & Kjaer 4189 (частотный диапазон – от 6.3 Гц до 20 кГц), расположенных по дуге радиусом 2 м от среза сопла в диапазоне полярных углов θ от 20° до 110° от оси струи с шагом 10° . Микрофоны устанавливались на штативах, так что они были размещены на той же высоте, что и ось струи, и были вынесены вперед по направлению к соплу с помощью цилиндрических державок с целью минимизации отражения звука от стоек штативов. Схема расположения микрофонов показана на рис. 1б.

Сопло можно было вращать относительно своей оси, что позволило провести измерения для различных азимутальных углов наблюдения $\vartheta = 0^\circ, 45^\circ$ и 90° (рис. 2). Таким образом, данная схема измерений позволяла получить спектральные характеристики и диаграмму направленности шума холодной струи, истекающей из плоского сопла, в широком диапазоне полярных и азимутальных углов.

Плоское сопло могло испытываться как в статических условиях, так и в условиях спутного потока со скоростью до 80 м/с и диаметром 0.4 м;

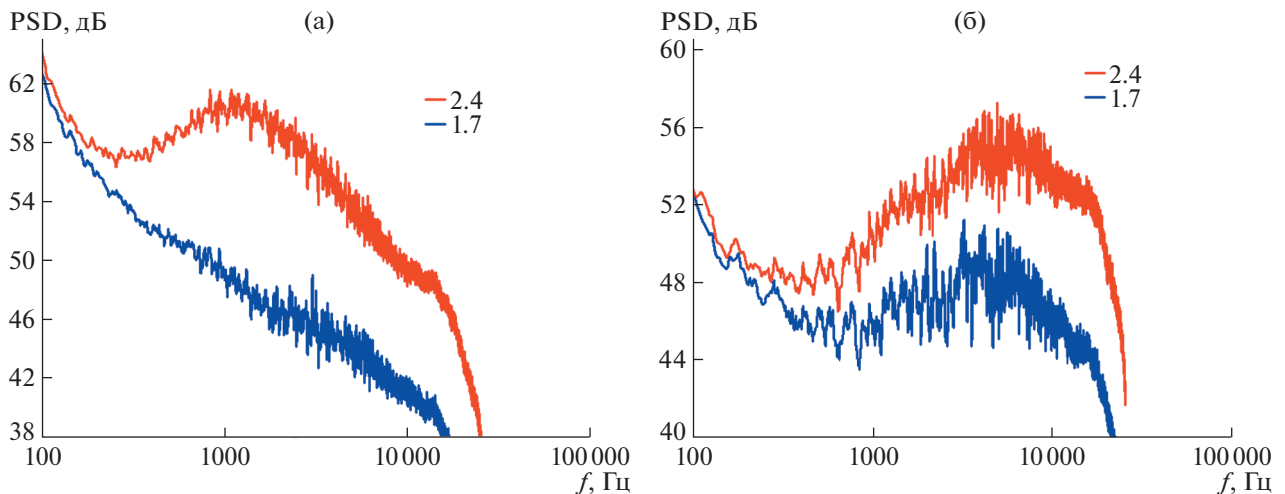


Рис. 3. Спектры шума плоского сопла, установленного под углом $\vartheta = 0^\circ$, для перепадов давлений $\pi_c = 1.7$ и 2.4 при скорости спутного потока 80 м/с. Микрофон расположен под углом $\theta = 30^\circ$ (а), $\theta = 90^\circ$ (б).

перепад давления на срезе плоского сопла при этом менялся в диапазоне $\pi_c = 1.6$ – 2.5 .

Примеры измеренных спектров шума приведены на рис. 3 для перепадов давлений $\pi_c = 1.7$ и 2.4 при скорости спутного потока 80 м/с для двух углов наблюдения $\theta = 30^\circ$ и $\theta = 90^\circ$. Важно отметить отсутствие в данных спектрах тональных компонент, указывающих на возможные резонансы, которые могут возникать в соплах типа “миксер–эжектор”.

Одним из важнейших вопросов, который встает при исследовании акустической эффективности такого рода сопел с системами шумоглушения, заключается в определении эквивалентного сопла, с которым происходит сравнение по шуму. Исследуемое сопло предполагает, что поток от двух двигателей соединится в одном плоском сопле; как следствие, в качестве эквивалентного случая можно выбрать как одну круглую струю, соответствующую струе, истекающей из плоского сопла, так и две круглые струи, моделирующие исходные струи двигателей. Шум круглой струи определяется интегральными характеристиками, такими как скорость истечения U и площадь сопла A ; кроме того, сопло должно обеспечивать тягу F , необходимую для полета самолета. Выбор любой пары из этих трех параметров может рассматриваться как возможный вариант для определения эквивалентной струи.

В данной работе в качестве эквивалентной струи рассматривается круглая струя с той же тягой F , что и исходное плоское сопло при том же π_c (что эквивалентно равенству скоростей). Заглушенная камера АК-2 ЦАГИ не оборудована экспериментальными средствами для измерения тяги сопел, поэтому тяга исследуемой модели плоского сопла была взята из стационарного аэродинамиче-

ского расчета в программном комплексе CFX, параметры которого (размеры модели, давление и температура на бесконечности) соответствовали параметрам эксперимента в АК-2 ЦАГИ. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены результаты расчета для распределения числа Маха в различных сечениях плоского сопла.

На основе численного расчета тяги плоского сопла для заданного режима (например, $\pi_c = 2.4$), с помощью полуэмпирической методики ЦАГИ для расчета шума круглых струй вычислялись спектры шума эквивалентных струй в тех же точках, где были расположены микрофоны в акустическом эксперименте в АК-2 ЦАГИ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5–8 показаны результаты сравнения экспериментальных данных для шума плоского сопла и расчетных данных для шума эквивалентной круглой струи для режима истечения струи $\pi_c = 1.7$ в статических ($V_{cf} = 0$ м/с) и полетных ($V_{cf} = 80$ м/с) условиях для положения сопла, соответствующего $\vartheta = 90^\circ$ (рис. 2в). Этот режим соответствует режиму набора высоты перспективного СГС. В качестве эквивалентной струи взята круглая струя с перепадом давлений $\pi_c = 1.7$ с той же тягой; потери тяги для круглой струи приняты равными 2%.

На рис. 5, 6 показаны результаты для статического и полетного режимов в виде матриц шума исходной и эквивалентной струй и их разностной матрицы Δ . Отрицательные значения Δ соответствуют случаю, когда исследованная струя оказывалась менее шумной, чем эквивалентная круглая.

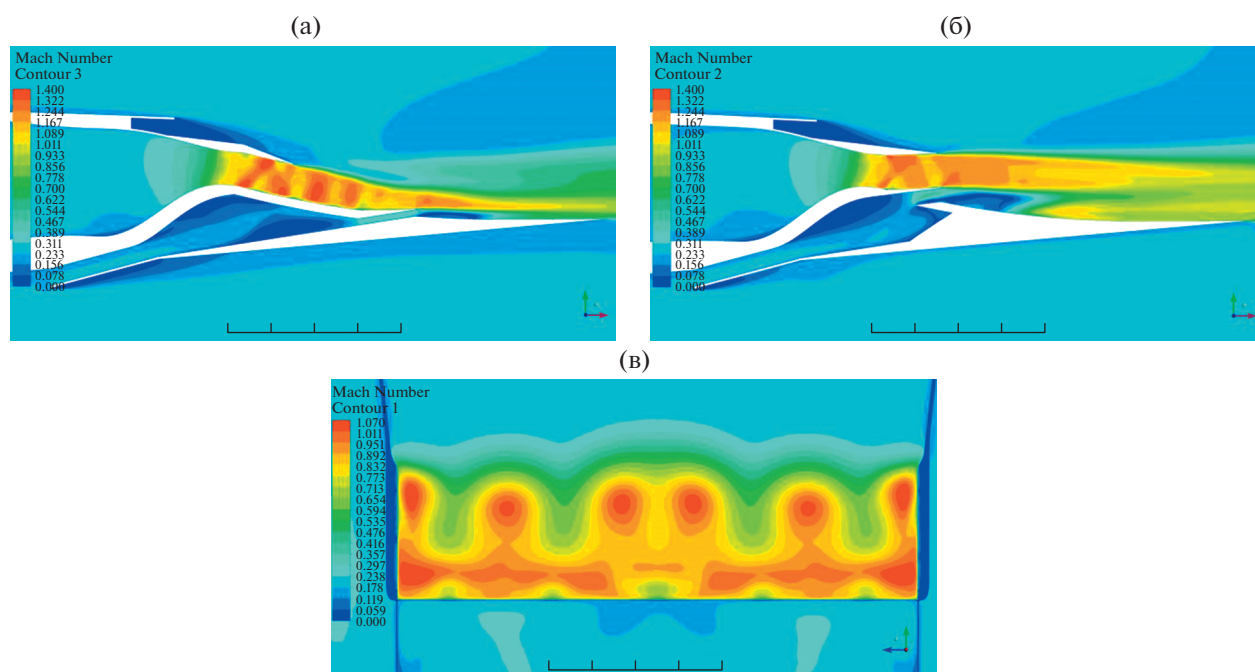


Рис. 4. Результаты численного моделирования для распределения числа Маха в различных сечениях сопла: а и б – вдоль сопла, в – в сечении сопла. $\pi_c = 2.4$, скорость спутного потока 80 м/с.

На рис. 7, 8 представлено прямое наложение спектров двух струй для углов 30° , 60° , 90° и 110° . Исследуемое сопло дает снижение шума под малыми углами к оси струи, однако в боковом направлении при этом наблюдается значительное (более 10 дБ) усиление шума, связанное, по-видимому, со взаимодействием слоя смешения с задней кромкой хвостовой части. В целом для статических условий исследуемое плоское сопло является более шумным.

В условиях наличия спутного потока, моделирующего полет, шум взаимодействия для исследуемого сопла существенно ослабляется, скорее всего, вследствие работы эжектора. Наблюдается существенное (~ 10 дБ) снижение шума под малыми углами к оси струи (до 40°), однако в боковом направлении (углы $\sim 90^\circ$) остается превышение над уровнем шума эквивалентной круглой струи. Нужно также отметить, что в эксперименте шум на частотах до ~ 1.3 кГц связан со спутным потоком, поэтому анализ данных нужно проводить для частот выше 1.3 кГц. При наличии областей снижения и усиления шума сложно оценить, является ли интегральный эффект применения предложенного сопла позитивным или негативным. Для этого необходимо провести оценки шума конкретного проекта СГС с тем или иным соплом в метрике EPNL.

Аналогичные сравнения были проведены для взлетного режима, где в качестве эквивалентной круглой струи бралась струя с тем же перепадом

$\pi_c = 2.4$ и с той же тягой, что и струя из плоского сопла. Потери тяги для круглой струи были приняты равными 2%. Поскольку перепад $\pi_c = 2.4$ является сверхкритическим, предполагалось, что круглое сопло выполнено так, чтобы струя была идеально расширенной, т.е. расчетное число Маха для сопла предполагалось равным 1.192. Из данных эксперимента брались данные, соответствующие излучению шума в боковом направлении под углом $\vartheta = 45^\circ$ (рис. 2б), что приблизительно соответствует положению самолета при измерении шума сбоку на режиме взлета.

Было получено, что результаты для режима взлета ($\pi_c = 2.4$) аналогичны результатам для режима набора высоты ($\pi_c = 1.7$). В статических условиях для исследуемого сопла наблюдается значительный шум взаимодействия струи и задней кромки хвостовой части, направленный в область боковых углов, при некотором снижении шума в области малых углов к оси струи. Для условий полета снижение шума под малыми углами (до 40°) усиливается при одновременном ослаблении шума взаимодействия для бокового направления (углы более 50°). Опять же, для оценки интегрального эффекта необходимо провести оценку шума самолета в метрике EPNL.

Рассмотрим также влияние размера эквивалентной струи на примере режима набора высоты при наличии спутного потока. Предположим, что та же тяга, что и у исследуемого сопла, создается не одиночным круглым соплом, как рассмотрено

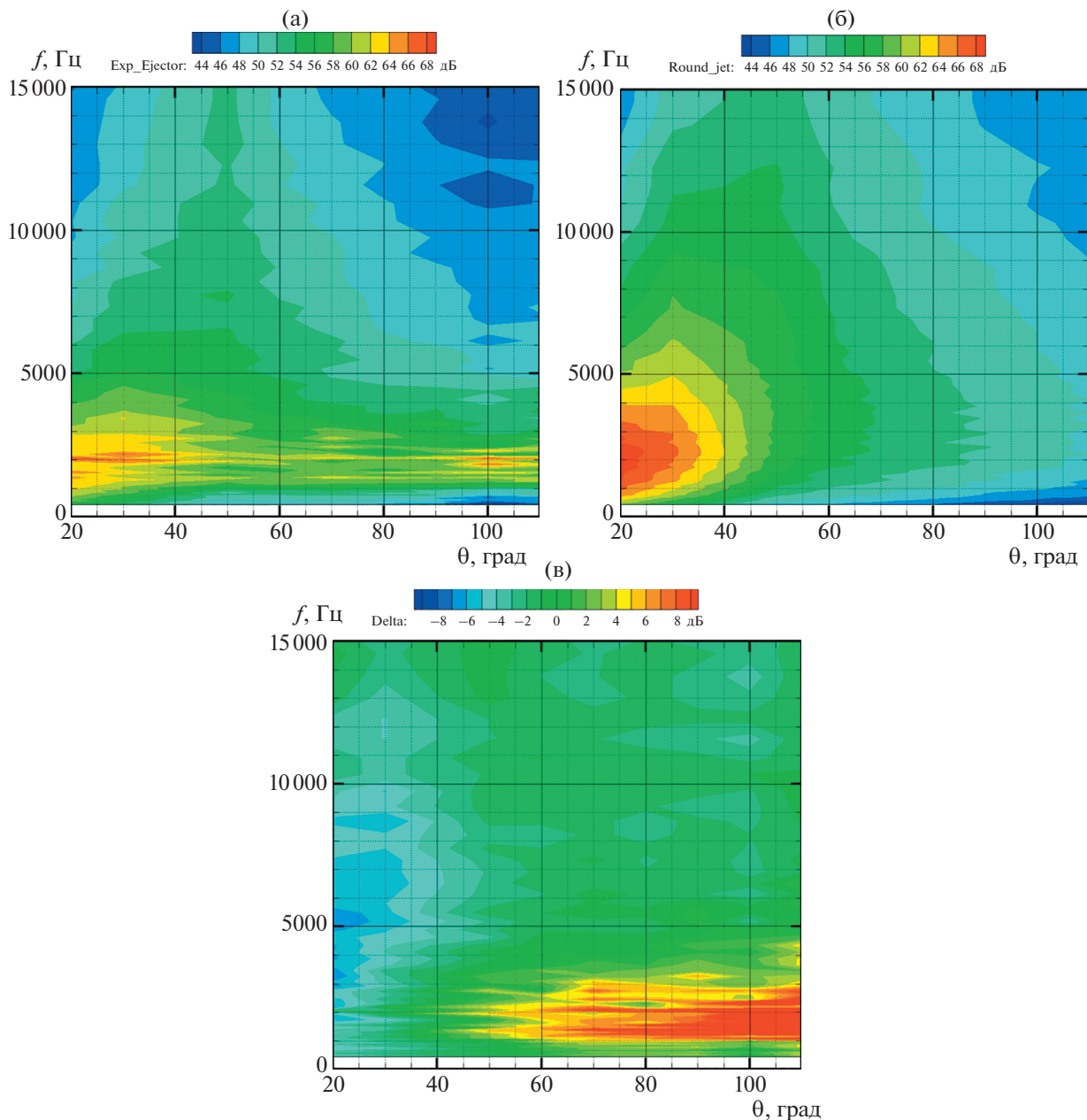


Рис. 5. Режим $\pi_c = 1.7$, $V_{cf} = 0$, $\vartheta = 90^\circ$: а – эксперимент; б – круглая струя (расчет); в – разница уровней “эксперимент” – “круглая струя”.

выше, а двумя одинаковыми соплами меньшего размера с перепадом давления $\pi_c = 1.7$ в каждом (площадь среза каждого сопла при этом равна половине площади плоского сопла $A/2$). Для простоты оценок предполагаем, что аэродинамическое и акустическое взаимодействие двух круглых струй отсутствует. Тогда акустическое излучение такой системы эквивалентно удвоенному по мощности шуму одиночной круглой струи с площадью среза $A/2$.

На рис. 9 показаны спектры трех конфигураций: экспериментально измеренные спектры, спектры одиночной круглой струи эквивалентной тяги и спектры системы из двух струй эквивалентной тяги. Видно, что при увеличении количества круглых струй спектры сдвигаются в область более высоких частот и их амплитуда пропорционально уменьшается. Для рассматриваемого случая это приводит к тому, что снижение шума исследуемого сопла на малых углах становится более заметным при сравнении с системой двух круглых

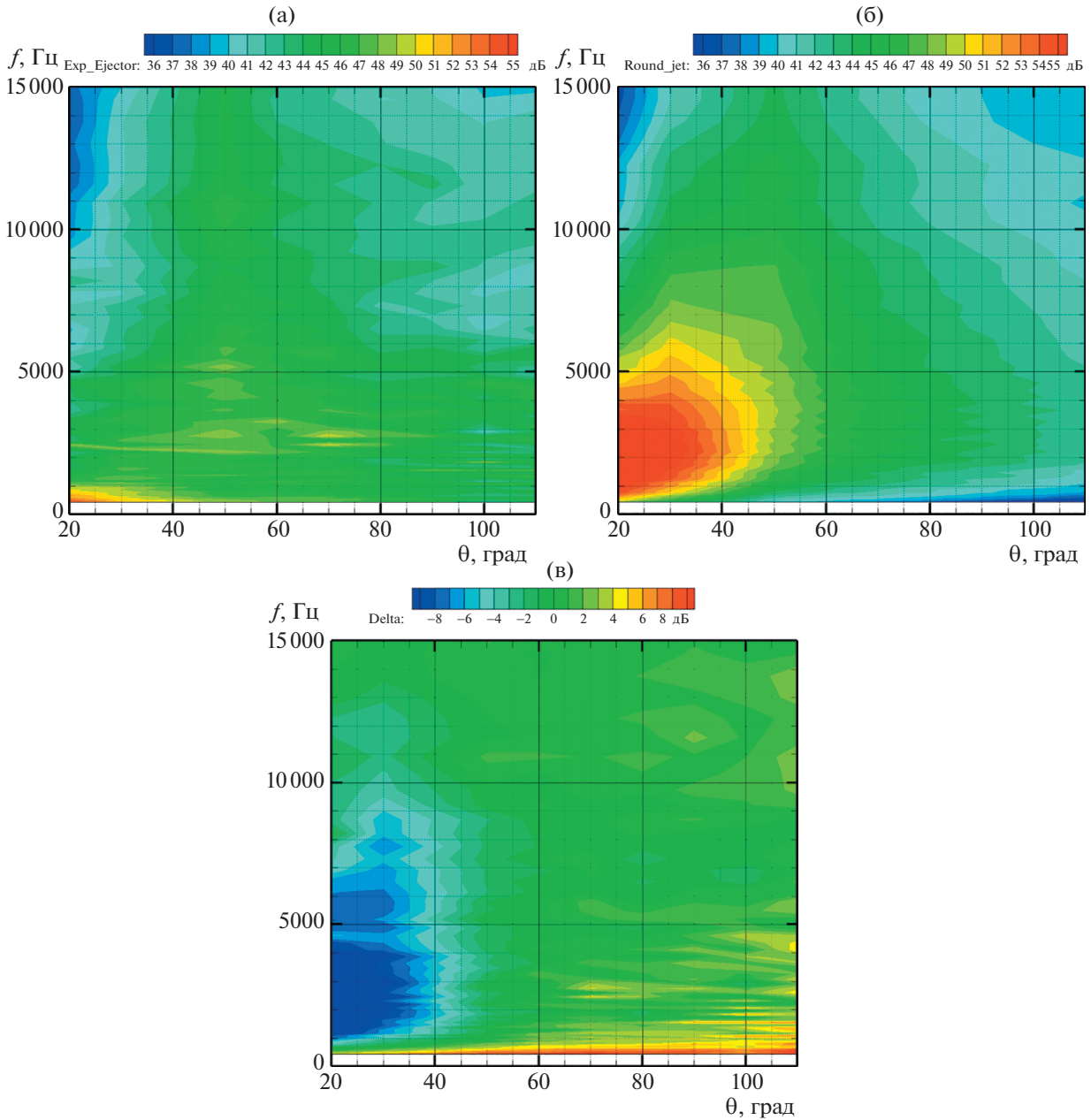


Рис. 6. Режим $\pi_c = 1.7$, $V_{cf} = 80$ м/с, $\vartheta = 90^\circ$: а – эксперимент; б – круглая струя (расчет); в – разница уровней “эксперимент” – “круглая струя”.

струй, однако возрастает относительное усиление шума в боковом направлении.

Этот эффект наглядно проиллюстрирован на рис. 10, где показаны разностные матрицы шума для случая сравнения с одиночной круглой струей (рис. 10а эквивалентен рис. 6в) и с двумя круглыми струями (рис. 10б).

Наличие областей как усиления, так и снижения шума для плоского сопла свидетельствует о том, что оно может привести как к усилению шума перспективного СГС на местности, так и к его снижению; определение итогового эффекта при-

менения плоского сопла требует оценки применительно к конкретному проекту СГС. Вместе с тем полученные данные наглядно показывают существенное снижение шума (до 9 дБ) на малых углах в зоне максимума спектра круглой струи в диапазоне частот до 5–10 кГц, что должно соответствовать частотам до 1–2 кГц на натурном сопле, соответствующих наиболее хорошо слышимому диапазону в метрике EPNL. Усиление шума наблюдается на низких частотах, что, скорее всего, не даст вклада в метрике EPNL. Основная часть спектрограмм на рис. 10 показывает незначительное усиление/ослабление шума по отноше-

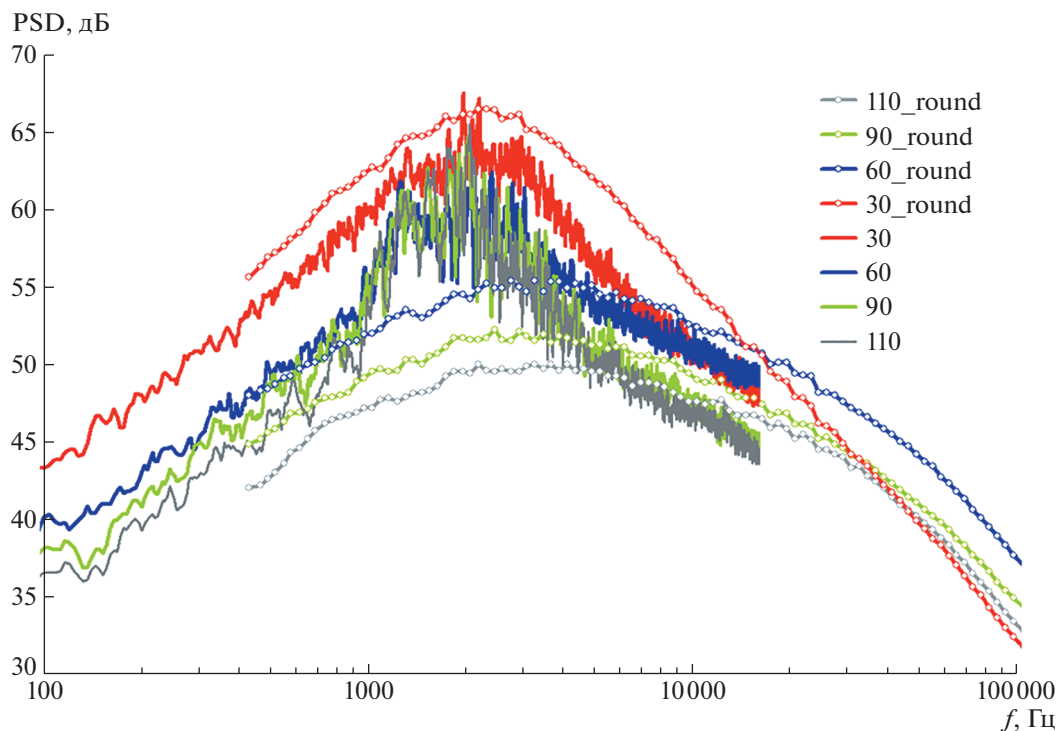


Рис. 7. Сравнение спектров шума для режима $\pi_c = 1.7$, $V_{cf} = 0$, $\vartheta = 90^\circ$: линии – эксперимент; маркеры – круглая струя (расчет).

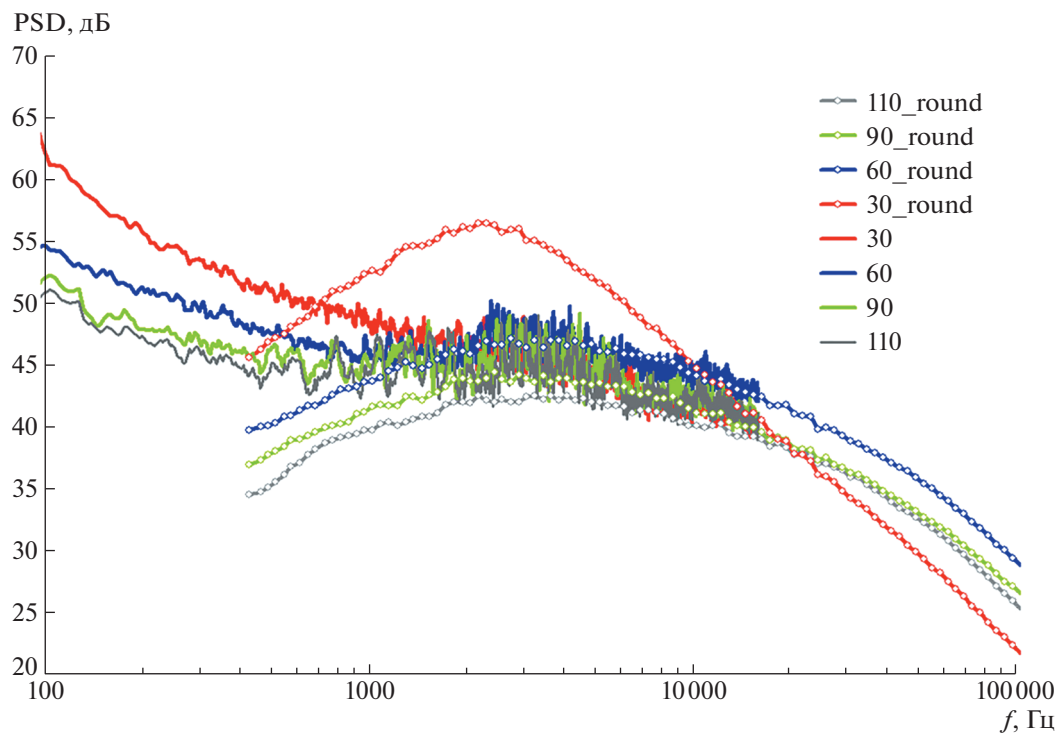


Рис. 8. Сравнение спектров шума для режима $\pi_c = 1.7$, $V_{cf} = 80$ м/с, $\vartheta = 90^\circ$: линии – эксперимент; маркеры – круглая струя (расчет).

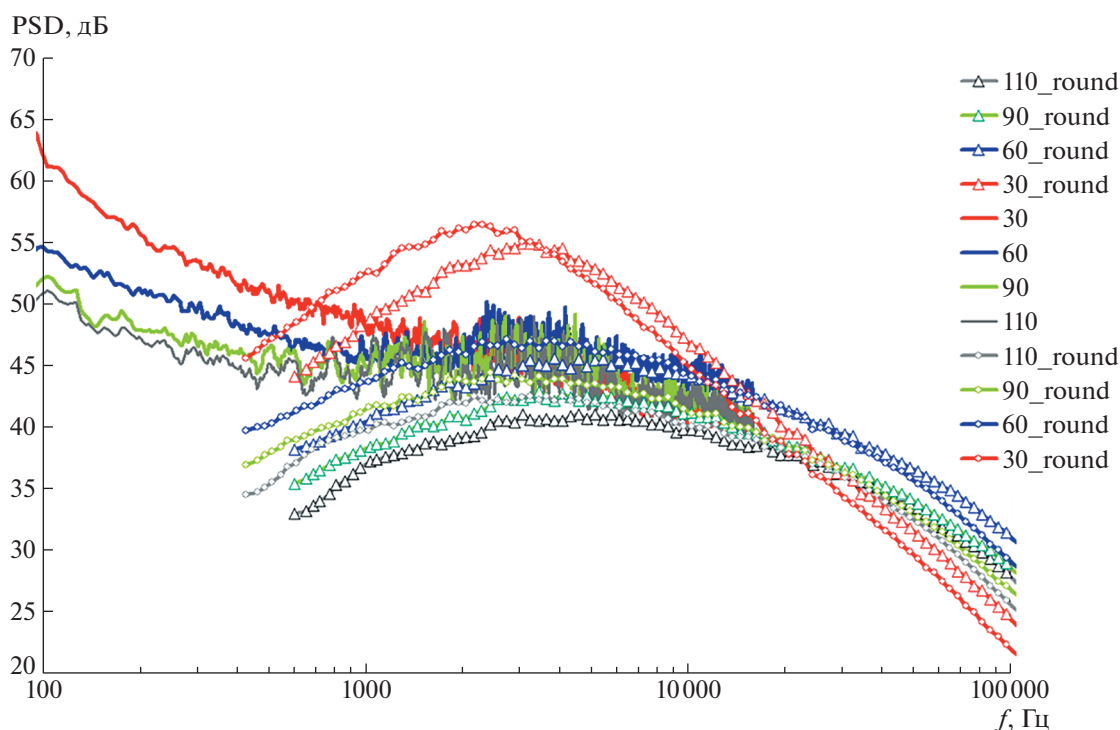


Рис. 9. Сравнение спектров шума для режима $\pi_c = 1.7$, $V_{cf} = 80$ м/с, $\vartheta = 90^\circ$: линии – эксперимент; круглые маркеры – одна круглая струя (расчет); треугольные маркеры – две круглых струи (расчет).

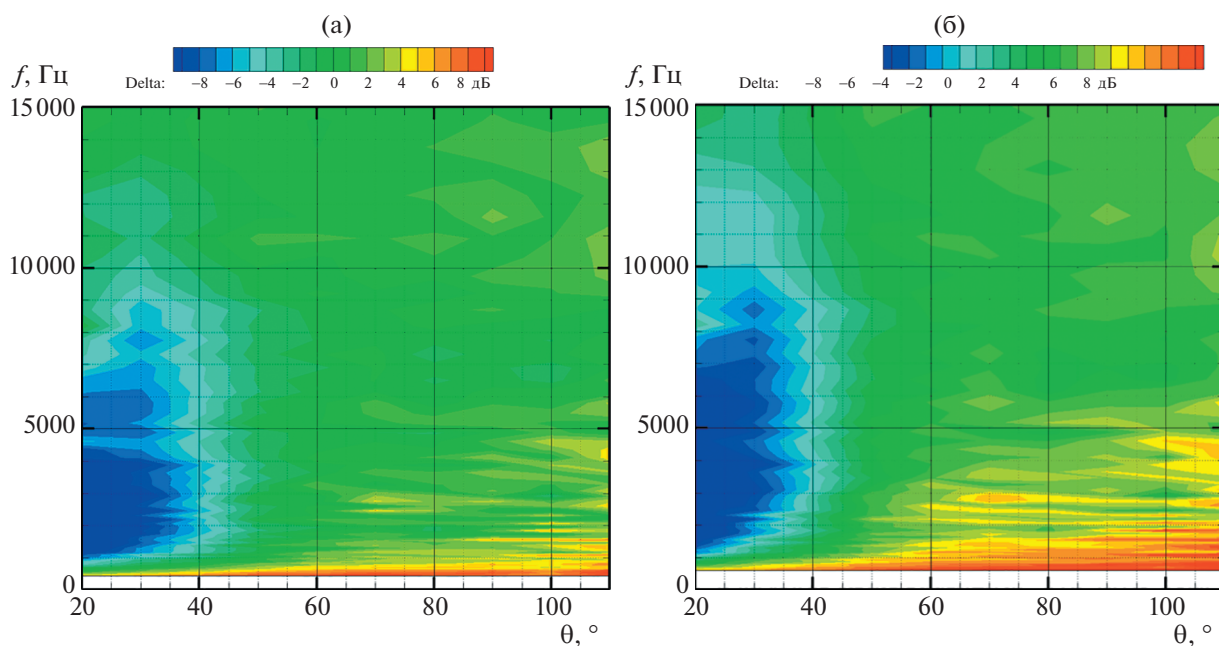


Рис. 10. Режим $\pi_c = 1.7$, $V_{cf} = 80$ м/с, $\vartheta = 90^\circ$: а – разница уровней “эксперимент” – “круглая струя”; б – разница уровней “эксперимент” – “две круглых струи”.

нию к круглой струе. Это говорит о желательности проведения подробной оценки шума самолета с плоским соплом с учетом предполагаемых взлетно-посадочных характеристик.

Как уже отмечалось выше, при наличии областей снижения и усиления шума для оценки интегрального эффекта применения предложенного плоского сопла необходимо провести оценку шума конкретного проекта СГС с данным соплом

в метрике EPNL. Такая предварительная оценка шума на местности была проведена для перспективного СГС, разработанного в ЦАГИ [7]. Был выполнен пересчет измеренных спектров плоского сопла на натурные масштабы, и для предварительной траектории взлета проведен расчет шума СГС в метрике EPNL в соответствии с методикой, описанной в [3]. Кроме того, были выполнены оценки шума на местности базовых конфигураций данного СГС, где в качестве источника шума предполагались одна или две эквивалентные круглые струи. Полученные оценки шума показали, что применение данного плоского сопла может приводить к интегральному эффекту снижения шума на местности по сравнению с круглыми соплами; в частности, на режиме взлета плоское сопло приводит к снижению шума на величину до 2.7 EPNдБ.

Описанные выше результаты были получены на основе испытаний в АК-2 ЦАГИ шума холодной струи. В настоящий момент проводится модернизация установки АК-2 ЦАГИ с целью обеспечения возможности проведения испытаний с горячими струями. Для уточнения оценки эффекта применения плоского сопла на шум струи планируется провести в модернизированной АК-2 ЦАГИ измерения шума горячей струи, истекающей из плоского сопла, и выполнить расчеты шума на местности для уточненной траектории взлета.

ВЫВОДЫ

В заглушенной камере АК-2 ЦАГИ проведены экспериментальные исследования акустической эффективности маломасштабной модели плоского сопла с системой шумоглушения, как в статических условиях, так и в условиях спутного потока.

Для определения эффективности системы шумоглушения было проведено сравнение измеренных уровней шума для плоского сопла с уровнями шума эквивалентной круглой струи, полученными на основе полумпирической методики ЦАГИ расчета шума круглых струй той же тяги, что и у плоского сопла. Показано, что в статических условиях плоское сопло по сравнению с эквивалентной круглой струей дает снижение шума под малыми углами к оси (до 40°), однако в боковом направлении (>90°) наблюдается значительное (более 10 дБ) усиление шума в области средних частот, связанное, по-видимому, со взаимодействием слоя смещения с задней кромкой хвостовой части. В условиях наличия спутного потока, моделирующего полет, шум взаимодействия для исследуемого сопла существенно ослабляется, вероятно, вследствие работы эжектора. Наблюдается существенное (~10 дБ) снижение шума под малыми углами к оси струи (до 40°), однако в боковом направлении (>90°) сохраняется превышение над уровнем шума эквивалентной круглой струи.

Было также выполнено сравнение шума плоского сопла с шумом двух эквивалентных круглых струй. При увеличении количества круглых струй спектры их шума сдвигаются в область более высоких частот, а их амплитуда пропорционально уменьшается. Для рассматриваемого случая это приводит к тому, что снижение шума исследуемого сопла на малых углах становится более заметным при сравнении с шумом двух круглых струй, однако возрастает относительное усиление шума в боковом направлении, причем такая ситуация наблюдается как в статических условиях, так и при наличии спутного потока. Наличие областей как усиления, так и снижения шума для плоского сопла свидетельствует о том, что оно может привести как к усилению шума перспективного СГС на местности, так и к его снижению; определение итогового эффекта применения плоского сопла требует оценки шума на местности применительно к конкретному проекту СГС.

Приведенная в работе предварительная оценка шума на местности была получена для одной из концепций перспективного СГС, разработанной в ЦАГИ. Она показала, что применение данного плоского сопла может приводить к интегральному эффекту снижения шума на местности по сравнению с круглыми соплами, в частности, на режиме взлета плоское сопло приводит к снижению шума на величину до 2.7 EPNдБ. Для уточнения оценки эффекта применения плоского сопла на шум струи необходимы измерения шума горячей струи, истекающей из плоского сопла, и проведение расчетов шума на местности для уточненной траектории взлета.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспериментальная часть работы выполнена на базе УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ ЦАГИ, модернизируемой при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-11-2021-066.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко О.В., Маков Ю.Н. Звуковой удар: от физики нелинейных волн до акустической экологии (обзор) // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 3–30.
2. Piccirillo G., Viola N., Fusaro R., Federico L. Guidelines for the LTO Noise Assessment of Future Civil Supersonic Aircraft in Conceptual Design // Aerospace. 2022. V. 9. P. 27.
3. Kopiev V.F., Belyaev I.V., Dunaevsky A.I., Poukhov A.A., Trofimovsky I.L. On the Fundamental Possibility of a Supersonic Civil Aircraft to Comply with ICAO Noise Requirements Using Existing Technologies // Aerospace. 2022. V. 9. P. 187.
4. Кузнецов В.М. Эффективность методов снижения шума реактивных струй двигателей пассажирских самолетов // Акуст. журн. 2010. Т. 56. С. 91–102.

5. *Sun Y., Smith H.* Review and prospect of supersonic business jet design // *Prog. Aerosp. Sci.* 2017. V. 90. P. 12–38.
6. *Горбовской В.С., Кажан А.В., Кажан В.Г., Самохин В.Ф., Шенкин А.В.* Исследование аэродинамики сверхзвукового сопла с системой шумоглушения // *Уч. з. ЦАГИ.* 2020. Т. 51 (4). С. 56–72.
7. *Chernyshev S.L., Lyapunov S.V., Wolkov A.V.* Modern problems of aircraft aerodynamics // *Adv. Aerodyn.* 2019. V. 1. P. 7.

NOISE REDUCTION FOR HIGH-SPEED JET OF SST ENGINE BASED ON ACOUSTIC TESTS RESULTS FOR RECTANGULAR NOZZLE IN ANECHOIC CHAMBER AC-2 TSAGI

I. V. Belyaev^a, V. S. Gorbovskey^a, A. V. Kazhan^a, and G. A. Faranosov^a

^a*Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russia*

Jet noise is expected to be an important noise source for future supersonic civil transport (SST) during takeoff and climb regimes, so the development of SST jet noise reduction methods is a necessary condition for ensuring that SST complies with the community noise regulations. Within the framework of research on SST jet noise reduction, acoustic tests of the small-scale rectangular nozzle of the “mixer-ejector” type with a noise attenuation system were carried out for regimes corresponding to takeoff and climb, including the presence of coflow. Spectral characteristics and noise directivities in the far field were obtained for a wide range of azimuthal and polar angles. The results of these measurements were compared with two basic configurations: 1) one round nozzle with the same pressure and thrust as the rectangular nozzle, 2) two identical round nozzles, with the same pressure and total thrust as the rectangular nozzle. For equivalent jets corresponding to these two basic configurations, noise in the far field was determined based on the TsAGI semi-empirical method for calculating jet noise. Comparison with experimental data for the rectangular nozzle showed that there are ranges of observation angles and frequencies where noise reduction is observed due to the use of the rectangular nozzle compared to equivalent round jets, and ranges where the rectangular nozzle is noisier. The recalculation of the spectra to natural scales and the evaluation of SST noise in EPNL metric showed that the use of this rectangular nozzle can lead to an integral effect of community noise reduction compared to round nozzles.

Keywords: aeroacoustics, jet noise, rectangular nozzle, community noise, noise reduction