

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ.  
ШУМЫ И ВИБРАЦИИ

УДК 534.83

НАЗЕМНЫЕ СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ  
ПЛОСКОГО СОПЛА С ШУМОГЛУШЕНИЕМ

© 2023 г. И. В. Беляев<sup>а</sup> \*, С. Ю. Макашов<sup>а</sup>, М. Ю. Зайцев<sup>а</sup>, В. Г. Юдин<sup>а</sup>, А. В. Потапов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Центральный аэрогидродинамический институт, Москва, Россия

\*e-mail: [ivan.belyaev@tsagi.ru](mailto:ivan.belyaev@tsagi.ru)

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Важность шума струи для перспективного сверхзвукового гражданского самолета (СГС) на режимах взлета и набора высоты диктует необходимость разработки методов снижения шума струи и их последующей валидации в крупномасштабных и натуральных испытаниях. В данной работе приводятся результаты первых в российской практике наземных акустических испытаний плоского сопла с системой шумоглушения, которое устанавливается на двигатель дозвукового самолета – демонстратора технологии. Было рассмотрено плоское косое сопло с эжектором и экранами – элементами планера СГС. Проведено сравнение результатов испытаний для трех вариантов геометрии сопла: круглого сопла, соответствующего измерениям для исходного двигателя без модификаций, плоского сопла без экранов и плоского сопла с экранами. Было получено, что при использовании плоского сопла без экранов имеется два противоположных эффекта: усиление шума по сравнению с круглым соплом для углов наблюдения, близких к оси струи, и ослабление шума при углах наблюдения, близких к плоскости вращения вентилятора. Установка экранов приводит к усилению шума на величину до 5 дБ в области низких частот менее 150 Гц и снижению шума на величину 2 дБ для частот 250 Гц и выше. Оценка шума на местности в метрике EPNL показала, что применение данного плоского сопла с системой шумоглушения приводит к эффекту снижения шума на местности по сравнению с исходным круглым соплом.

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

DOI: 10.31857/S0320791923600075, EDN: IUNWXY

## ВВЕДЕНИЕ

Воздействие сверхзвукового гражданского самолета (СГС) на окружающую среду представляет собой одну из важнейших проблем при разработке сверхзвукового гражданского самолета и включает в себя такие эффекты как влияние СГС на климат [1], звуковой удар [2] и шум СГС на местности (в районе аэропорта) [3]. Данная работа посвящена исследованию проблемы снижения шума СГС. Несмотря на то, что сейчас нормы по шуму на местности для перспективных СГС отсутствуют, Международная организация гражданской авиации (ИКАО) ведет активную работу по их созданию. При этом ожидается, что перспективные СГС будут демонстрировать низкие уровни шума на местности, в целом соответствующие уровням шума дозвуковых самолетов [4].

Это представляет собой очень сложную техническую задачу, так как современные дозвуковые самолеты прошли значительный эволюционный путь и достигли впечатляющих успехов в области снижения шума, в основном за счет увеличения степени двухконтурности двигателей. Использо-

вание таких двигателей в перспективных СГС затруднено тем обстоятельством, что двигатели с большой степенью двухконтурности серьезно ухудшают аэродинамические характеристики СГС на трансзвуковом и сверхзвуковом режимах полета [5]. Как следствие, усилия по снижению шума перспективных СГС вынуждены сосредотачиваться на других способах шумоподавления, в частности, экранировании шума двигателей элементами планера.

Так как для самолетов с двигателями малой и средней степени двухконтурности, которые рассматриваются в качестве силовой установки перспективных СГС, одним из доминирующих источников шума является реактивная струя [6], то ключевую роль в снижении шума СГС будут играть методы снижения шума струи. Если снижение шума струи для дозвуковых самолетов достигалось в основном за счет снижения ее скорости из-за увеличения степени двухконтурности двигателя, то для перспективных СГС требуются другие методы снижения шума, не связанные со снижением скорости струи. Среди таких методов



**Рис. 1.** Наземные стендовые испытания плоского сопла в составе самолета. Крайний правый двигатель самолета оборудован плоским соплом с экранами (внизу) или без экранов (вверху).

можно выделить использование сопла с эжектором [7, 8] и экранирование шума струи [9, 10].

В рамках данной работы были проведены акустические испытания плоского сопла с эжектором как при наличии экранирующих элементов, так и в их отсутствие. Шум плоского сопла с экранами и без экранов сравнивался с базовым круглым соплом, что позволяет оценить акустическую эффективность плоского сопла. Особенность данной работы состояла в том, что впервые в отечественной практике акустические испытания плоского сопла были проведены в составе самолета на натурном двигателе, что обеспечивает не только корректное моделирование параметров самой струи (температуру, скорость истечения, число Рейнольдса и т.д.), но и учет влияния других источников шума двигателя, например шума вентилятора. Для испытаний использовался 4-двигательный

дозвуковой самолет, который выступал в роли демонстратора технологий.

### ОПИСАНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения тестовых акустических испытаний силовой установки с системой шумоглушения один из двигателей самолета оснащался плоским соплом с экранами или без них (рис. 1). Во время испытаний самолет неподвижно располагался на земле.

Испытания проводились для трех режимов работы двигателя: посадочный малый газ, номинальный режим и максимальный режим. Двигатель последовательно работал на каждом из этих режимов в течение ~3 мин для обеспечения сбора достаточной статистики для усреднения спектров шума. После полного прохода от малого газа до максимального режима двигатель возвращался

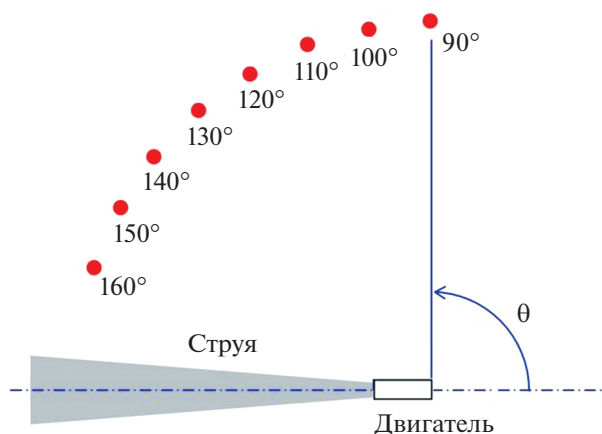


Рис. 2. Расположение точек измерений на гоночной площадке.

обратно к режиму малого газа и испытания повторялись. В результате каждый из режимов был измерен несколько раз: 3 раза для круглого сопла, 2 раза для плоского сопла без экранов и 2 раза для плоского сопла с экранами. Остальные двигатели самолета во время испытаний были выключены.

Акустические измерения проводились с помощью 1/4" микрофонов GRAS типа 40BE (частотный диапазон 4 Гц–80 кГц, динамический диапазон 30–168 дБ, чувствительность 4 мВ/Па), установленных непосредственно на бетонной поверхности измерительной площадки с использованием металлических державок. Данные с микрофонов регистрировались с помощью 8-канального регистратора акустических сигналов “Экофизика-500”. Перед проведением испытаний была выполнена калибровка микрофонов и проверка работоспособности измерительной аппаратуры в условиях заглушенной камеры АК-2 ЦАГИ.

Микрофоны для акустических измерений были размещены в фиксированных точках относительно двигателя. Точки измерения располагались на дуге окружности радиусом 60 м с центром, расположенным под входом в воздухозаборник. Положение точек измерения и их нумерация приведены на рис. 2. Микрофоны были установлены на поверхности земли в задней полусфере в диапазоне углов  $\theta$  от  $90^\circ$  до  $160^\circ$  с шагом  $10^\circ$ .

Так как измерения шума проводились с помощью микрофонов, расположенных на бетонном основании, из измеренных уровней шума вычиталось значение в 6 дБ, соответствующее удвоению сигнала при измерении звука на твердой поверхности. Кроме того, к полученным спектрам шума применялась поправка на атмосферное затухание, учитывающая температуру и влажность воздуха во время измерений.

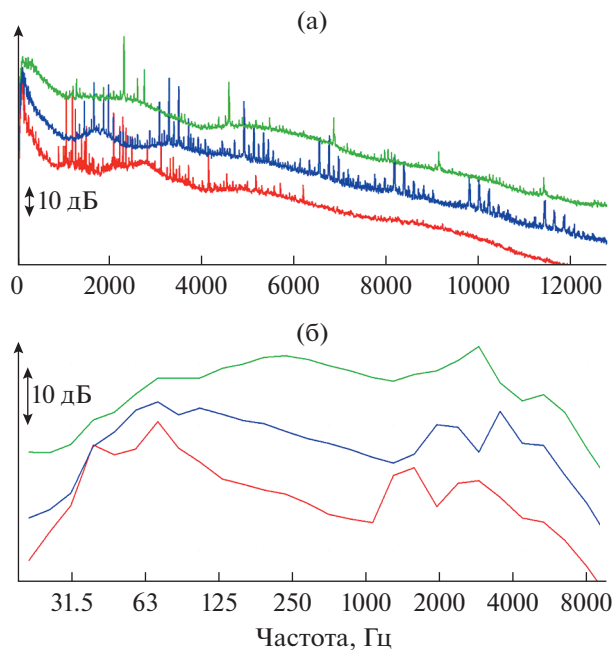


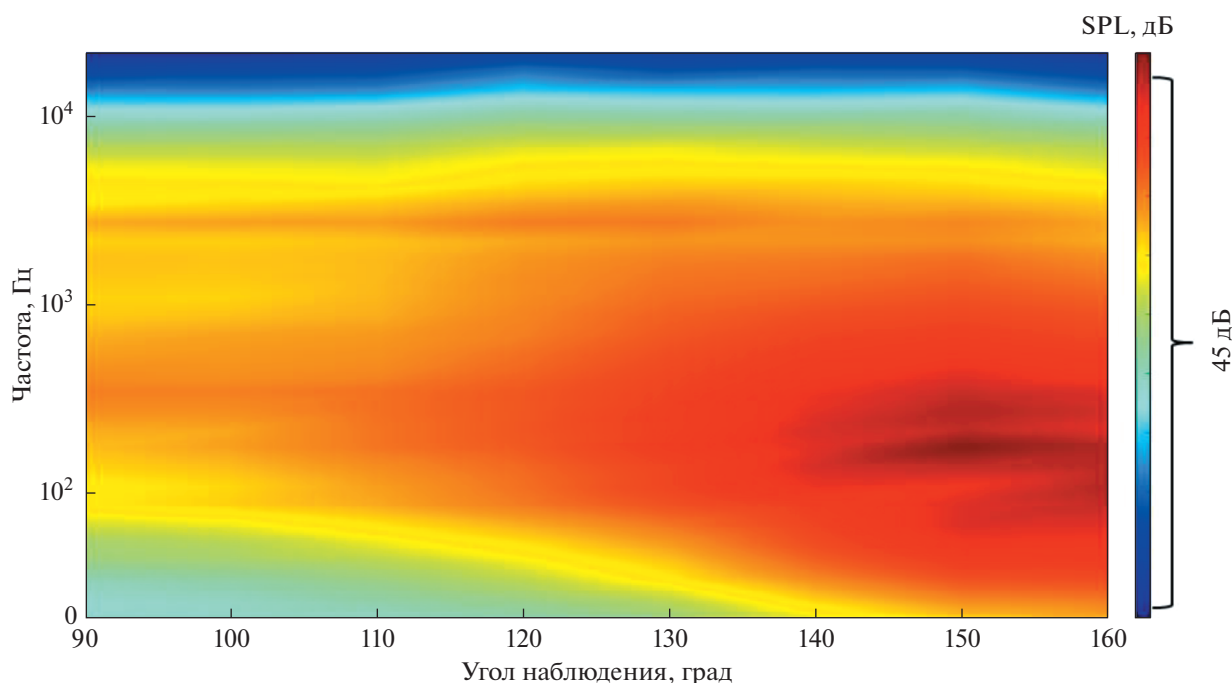
Рис. 3. Спектры шума для угла наблюдения  $90^\circ$  для трех режимов работы двигателя (красная кривая – малый газ, синяя – номинальный режим, зеленая – максимальный): (а) – узкополосные, (б) – третьоктавные.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для каждой конфигурации сопла и каждого режима работы двигателя были измерены узкополосные и третьоктавные спектры на каждом микрофоне. Пример спектров шума для микрофона под  $90^\circ$  приведен на рис. 3 для всех трех режимов работы двигателя в конфигурации сопла с экранами. Тональные пики в узкополосном спектре шума связаны, по всей видимости, с шумом вентилятора. Спектры для других углов наблюдения  $\theta$  на максимальном режиме работы двигателя для плоского сопла с экранами для всех использованных микрофонов приведены на рис. 4.

Стоит отметить, что спектры на рис. 3–4 представляют собой первичные результаты измерений до введения поправок. Как уже отмечалось выше, при анализе результатов к этим спектрам применяются поправки на отражение от земли и на атмосферное затухание.

Сравнение третьоктавных спектров круглого сопла и плоского сопла с экранами и без экранов приведено на рис. 5 для максимального режима, под углами  $90^\circ$  и  $160^\circ$  от оси двигателя. Видно, что для угла наблюдения в плоскости вращения вентилятора ( $\theta = 90^\circ$ ) плоское сопло без экранов приводит к снижению шума практически во всем диапазоне измеряемых частот. При этом для угла наблюдения вблизи оси струи ( $\theta = 160^\circ$ ) плоское



**Рис. 4.** Спектры уровней звукового давления для всех исследованных углов наблюдения  $\theta$  на максимальном режиме работы двигателя.

сопло без экранов приводит к существенному снижению шума на величину до 9 дБ в области низких частот (до 200 Гц) и к значительному усилению шума на величину до 10 дБ для более высоких частот.

Установка экранов на плоское сопло играет скорее отрицательную роль для угла наблюдения вблизи струи ( $\theta = 160^\circ$ ). В области низких частот (до 250 Гц) она приводит к увеличению шума на величину до 5 дБ при незначительном (менее 0.5 дБ) снижении для высоких частот (более 4 кГц) по сравнению с шумом струи из плоского сопла без экранов. По сравнению с круглым соплом шум струи из плоского сопла с экранами оказывается выше почти во всем частотном диапазоне, за исключением очень низких частот. Для угла наблюдения в плоскости вращения вентилятора ( $\theta = 90^\circ$ ) экраны также приводят к некоторому усилению шума в области низких частот (менее 250 Гц) и к снижению шума на величину до 2 дБ в области высоких частот (более 1000 Гц) по сравнению с плоским соплом без экранов. По сравнению с круглым соплом плоское сопло с экранами также обеспечивает снижение шума почти во всем диапазоне частот.

Более наглядно эффект плоского сопла на шум струи можно представить в виде разности между уровнями шума для плоского сопла  $SPL_{\text{плоское}}$  и для круглого сопла  $SPL_{\text{круглое}}$ , выраженными в дБ:

$$\Delta_1(f) = SPL_{\text{плоское}}(f) - SPL_{\text{круглое}}(f).$$

На рис. 6 приведен график зависимости  $\Delta_1(f)$  в дБ для плоского сопла без экранов для максимального режима работы двигателя. Из рис. 6 видно, что при использовании плоского сопла без экранов имеется два противоположных эффекта: ослабление шума струи для углов наблюдения, близких к плоскости вращения вентилятора, и усиление шума для углов наблюдения, близких к оси струи для частот выше 200 Гц.

Аналогично, влияние экранов на шум плоского сопла можно наглядно представить в виде разности между уровнями шума для плоского сопла с экранами  $SPL_{\text{экраны}}$  и сопла без экранов  $SPL_{\text{плоское}}$ , выраженными в дБ:

$$\Delta_2(f) = SPL_{\text{экраны}}(f) - SPL_{\text{плоское}}(f).$$

На рис. 7 приведен график зависимости  $\Delta_2(f)$  в дБ для максимального режима работы двигателя. Видно, что в области низких частот (менее 300 Гц) для измеренных углов наблюдения  $\theta$  установка экранов приводит в основном к усилению шума струи, истекающей из плоского сопла. В области более высоких частот экраны в целом приводят к снижению шума плоского сопла. Такое влияние экранов является ожидаемым, так как эффективность экранирования возрастает с увеличением частоты [11], так что в области высоких частот установка экранов приводит к снижению шума, особенно для углов наблюдения вдали от оси струи.

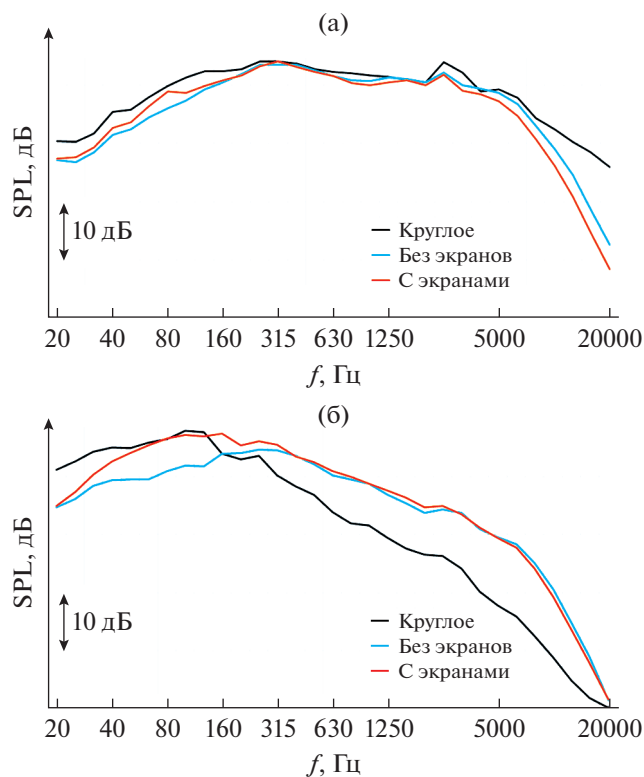


Рис. 5. Сравнение третьоктавных спектров для круглого сопла и плоского сопла с эжектором на максимальном режиме: (а) –  $90^\circ$ , (б) –  $160^\circ$ .

В целом можно сказать, что использование плоского сопла как с экранами, так и без экранов демонстрирует два противоположных эффекта: ослабление и усиление шума в определенных диапазонах частот и углов наблюдения.

Для того чтобы определить, какой из этих двух эффектов окажется преобладающим, была выполнена оценка шума самолета на местности в боковой точке [12] для случая, когда в качестве матриц шума двигателя использовались измеренные в данных акустических испытаниях третьоктавные спектры шума для круглого и плоского сопла с экранами и без них. Оценки шума на местности в метрике EPNL выполнялись для рассматриваемого дозвукового самолета – демонстратора технологии с соответствующей взлетной траекторией и параметрами работы двигателей. Расчеты шума проводились в программном пакете SOPRANO [13], разработанном в рамках европейского проекта SILENCE(R). Данный программный пакет был ранее провалидирован в ЦАГИ с помощью сравнения с результатами расчетов на основе внутренних расчетных программ и сравнения с экспериментальными данными, которое продемонстрировало хорошее согласие полученных результатов. Схема расчета шума на местности включала эффекты поглощения в атмосфере, бокового затухания и отражения от земли.

Было получено, что для рассматриваемого самолета использование плоского сопла без экра-

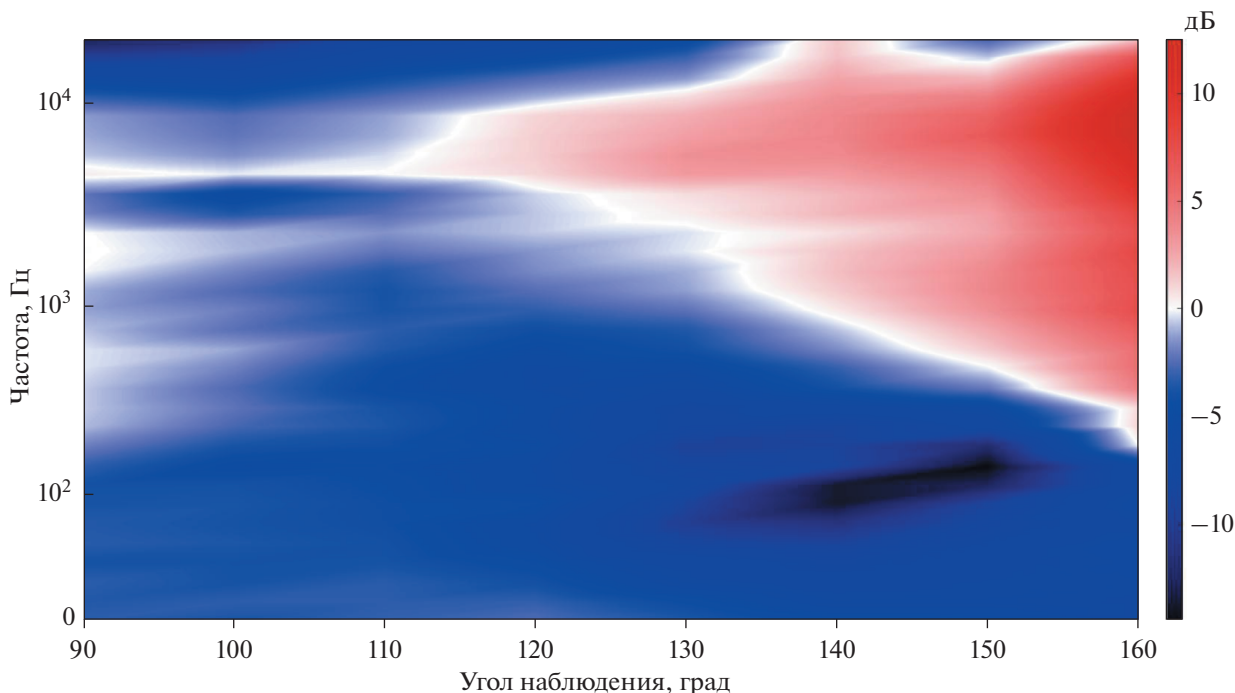


Рис. 6. Зависимость  $\Delta_1(f)$  в дБ для максимального режима работы двигателя.

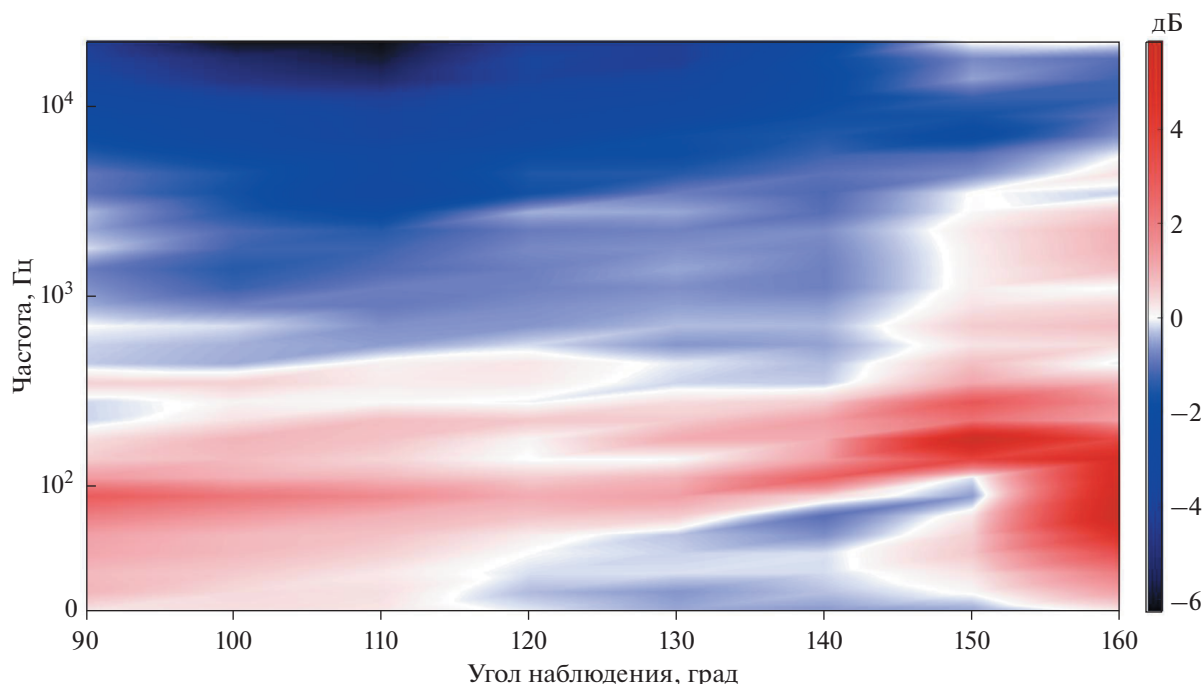


Рис. 7. Зависимость  $\Delta_2(f)$  в дБ для максимального режима работы двигателя.

нов приводит к снижению шума в боковой точке на величину 4 EPNдБ по сравнению с круглым соплом. Установка экранов приводит к дополнительному эффекту снижения шума на величину 1 EPNдБ по сравнению с плоским соплом без экранов. Полученные результаты показывают, что рассматриваемое плоское сопло может использоваться для снижения шума струи.

Однако стоит отметить, что оценка шума на местности была выполнена только для одной сертификационной (боковой) точки, соответствующей взлету самолета, так как положение микрофонов в эксперименте соответствовало именно ей. Для других сертификационных точек влияние плоского сопла на шум струи не оценивалось. Так как азимутальная неоднородность диаграммы направленности плоского сопла становится значительной (до  $\pm 5$  дБ) для числа Струхала  $St > 1$  [14], то можно ожидать, что в области средних и высоких частот рассматриваемое плоское сопло также будет иметь азимутально неоднородную диаграмму направленности шума струи. Как следствие, для остальных сертификационных точек влияние плоского сопла на шум струи требует отдельного дополнительного исследования, в котором будет исследована диаграмма направленности шума плоского сопла для других азимутальных углов, например, с помощью поворота плоского сопла относительно оси струи. Кроме того, представляет интерес проведение аналогичных исследований для различных сопел в условиях, когда сохраняются не режимы работы двигателя (т.е. оборо-

ты вентилятора), а его тяга. Тем не менее, полученный результат снижения шума в метрике EPNL для боковой сертификационной точки является обнадеживающим и указывает, что данное (или аналогичное) плоское сопло с системой шумоглушения может использоваться для снижения шума струи перспективного СГС.

### ВЫВОДЫ

Проведены тестовые акустические испытания элементов системы шумоглушения силовой установки в составе 4-двигательного дозвукового самолета. Во время испытаний самолет находился неподвижно на земле, из 4 двигателей работал только один – крайний правый. Получены узкополосные и третьоктавные спектры уровней звукового давления для базового круглого сопла двигателя и для плоского сопла с экранами и без экранов.

Показано, что использование плоского сопла как с экранами, так и без экранов демонстрирует два противоположных эффекта: ослабление и усиление шума в определенных диапазонах частот и углов наблюдения. Так, по сравнению с круглым соплом установка плоского сопла без экранов приводит для различных углов наблюдения к двум противоположным эффектам: значительному усилению шума (на величину до 9 дБ) в направлении, близком к оси струи, и к значительному снижению шума (на величину до 8 дБ) для углов наблюдения, близких к плоскости враще-

ния вентилятора, в широком диапазоне частот. Применение экранов приводит к значительному усилению шума (на величину до 5 дБ) в области низких частот (до 250 Гц) и снижению шума в области высоких частот на величину до 6 дБ по сравнению с шумом плоского сопла без экранов.

Для того чтобы определить, какой из этих двух эффектов окажется преобладающим, была выполнена оценка шума на местности в боковой точке для случая, когда в качестве матриц шума двигателя использовались измеренные в данных акустических испытаниях третьоктавные спектры шума для круглого и плоского сопла с экранами и без них. Было получено, что для рассматриваемого самолета использование плоского сопла без экранов приводит к снижению шума в боковой точке на величину 4 ЕРНдБ по сравнению с круглым соплом. Установка экранов приводит к дополнительному эффекту снижения шума на величину 1 ЕРНдБ по сравнению с плоским соплом без экранов.

Полученный положительный результат требует проведения дальнейших исследований, включая продолжение стендовых испытаний для определения азимутальной неоднородности диаграммы направленности шума и для исследования влияния формы сопла на тягу двигателя, а также проведения летных испытаний на натурном самолете-демонстраторе технологий СГС.

Калибровка микрофонов и проверка работоспособности измерительной аппаратуры была выполнена на базе УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ ЦАГИ, модернизируемой при поддержке Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2022-1036. Расчет спектрограмм разностей уровней шума модифицированного и базового сопел был выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-71-30016).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Matthes S., Lee D.S., De Leon R.R., Lim L., Owen B., Skowron A., Thor R.N., Terrenoire E.* Review: The Effects of Supersonic Aviation on Ozone and Climate // *Aerospace*. 2022. V. 9(1). P. 41.
2. *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.
3. *Knobloch K., Manoha E., Atinault O., Barrier R., Polacsek C., Lorteau M., Enghardt L.* Future Aircraft and the Future of Aircraft Noise // *Aviation Noise Impact Management*. 2022. P. 117–139. Springer, Cham.
4. *Connecting the World through Environmentally Responsible Supersonic Flight* // *ICAO Environmental Report 2022*. 2022. P. 63–66.
5. *Papamoschou D., Debiasi M.* Conceptual development of quiet turbofan engines for supersonic aircraft // *J. Propuls. Power*. 2003. V. 19. P. 161–169.
6. *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.
7. *Кузнецов В.М.* Эффективность методов снижения шума реактивных струй двигателей пассажирских самолетов // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. С. 91–102.
8. *Беляев И.В., Горбовской В.С., Кажан А.В., Фараносов Г.А.* Снижение шума высокоскоростной струи двигателя сверхзвукового гражданского самолета по результатам акустических испытаний модели плоского сопла в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ // *Докл. Рос. Академии наук. Физика, техн. науки*. 2022. Т. 506(1). С. 47–56.
9. *Salehian S., Mankbadi R.R.* Jet Noise in Airframe Integration and Shielding // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. P. 511.
10. *Денисов С.Л., Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А., Чернышев С.А.* Использование корреляционной модели случайных квадрупольных источников для расчета эффективности экранирования шума турбулентной струи на основе геометрической теории дифракции // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66(5). С. 540–555.
11. *Broadbent E.G.* Noise shielding for aircraft // *Prog. Aerosp. Sci.* 1976. V. 17. P. 231–268.
12. *ICAO. Environmental Protection. In Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation*, 8th ed. V. I: *Aircraft Noise*. ICAO: Montreal, QC, Canada, 2017.
13. *Van Oosten N.* SOPRANO Presentation (PDF) // *SOPRANO Workshop: Madrid, Spain, 21–22 June 2007*.
14. *Bridges J.E.* Azimuthal Noise Directivity of Non-Axisymmetric Jets // *AIAA Scitech 2021 Forum*, 2021. P. 1183.