

УДК 534.2

ПРОБЛЕМЫ СНИЖЕНИЯ ШУМА АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК С ПОМОЩЬЮ ЭФФЕКТА ЭКРАНИРОВАНИЯ

© 2021 г. С. Л. Денисов^{а, *}, Н. Н. Остриков^{а, **}, В. Ю. Гранич^{а, ***}

^аЦентральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского
Научно-исследовательский московский комплекс (НИМК ЦАГИ),
ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

*e-mail: stl.denisov@gmail.com

**e-mail: nikolay.ostrikov@tsagi.ru

***e-mail: vladislav.ganich@tsagi.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 05.02.2021 г.

Принята к публикации 08.02.2021 г.

Представлены результаты исследования адаптации Геометрической Теории Дифракции к задаче расчета дифракции звука, излучаемого из круглого цилиндрического канала на плоских полигональных экранах. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных по исследованию эффекта экранирования вращающихся звуковых мод в приложении к проблеме снижения на местности шума авиационной силовой установки. Статья подготовлена по материалам доклада на 3-й Всероссийской акустической конференции (21–25 сентября 2020 г., г. Санкт-Петербург).

Ключевые слова: метод последовательностей максимальной длины, импульсный отклик, шум вентилятора, вращающиеся звуковые моды, дифракция звуковых волн, Геометрическая Теория Дифракции (ГТД), эффективность экранирования

DOI: 10.31857/S0320791921030023

ВВЕДЕНИЕ

Развитие самолетов следующего поколения во многом будет определяться возможностью выполнения новых экологических требований по снижению воздействия авиации на окружающую среду. Реализация данного принципа на практике потребует принципиально новых подходов к созданию гражданского самолета. Выбор параметров силовой установки, аэродинамической схемы нового самолета и его взлетно-посадочных характеристик должен производиться из условий обеспечения выполнения экологических требований, предъявляемых к самолетам данного типа.

В качестве одного из возможных средств, призванных уменьшить акустическое воздействие на окружающую среду, в последнее время активно исследуется реализация в компоновке самолета эффекта экранирования шума авиационной силовой установки планером самолета. Первые оценки, выполненные в 1970-ые годы 20 века, предсказали чрезвычайно высокую эффективность экранирования, что послужило началом изучения влияния различных компоновок самолетов на снижение шума на местности [1–3].

С началом 21 века при проектировании перспективных самолетов [4, 5] начались активные

исследования интегральной компоновки. Однако экспериментальные исследования, выполненные за последнее два десятилетие, показали, что предшествующие расчеты существенно завышали эффективность экранирования. Анализ причин завышения расчетных значений эффективности экранирования, по сравнению с экспериментально измеренными, показал, что при расчете рассеяния звука на планере были использованы упрощенные методы расчета дифракции звука [6], а также не принималось во внимание свойство некомпактности авиационных источников шума, таких как струя, вентилятор и винт. Эти факты продемонстрировали необходимость адаптации существующих методов теории дифракции к проблеме расчета шума некомпактных источников, а также разработки новых моделей авиационных источников шума, которые корректно описывают распределение амплитуды и фазы звукового поля в точках, где происходит рассеяние звука на различных элементах конструкции планера самолета.

В качестве примера работы, в которой рассматриваются новые модели авиационных некомпактных источников шума, можно привести работу [7], посвященную исследованию экранирования шума струи. В данной работе на основе

корреляционной модели шума турбулентной струи [8] и Геометрической Теории Дифракции (ГТД) [9, 10] выполнен анализ эффективности экранирования шума круглой струи, истекающей из одноконтурного сопла. Для рассмотренных в [7] положений экрана и скоростей истечения струи полученные результаты продемонстрировали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных спектров шума струи для углов наблюдения от 60° до 90° . Однако для других углов наблюдения имело место расхождение между расчетными и экспериментальными зависимостями, обусловленное использованием корреляционной модели, которая не рассматривала явление рефракции звука на среднем течении струи.

Настоящая работа обобщает методы и подходы, рассмотренные в работах [7, 11], и представляет результаты расчетных и экспериментальных исследований экранирования плоским полигональным экраном вращающихся звуковых мод, излучаемых из круглого цилиндрического канала. Расчет экранирования вращающихся звуковых мод в данной работе проводится с помощью ГТД, интегральной теоремы Кирхгофа и точного решения задачи об излучении звука из бесконечного безфланцевого цилиндрического канала. В первом разделе будут представлены необходимые для дальнейшего понимания основные положения ГТД, а также результаты валидации ГТД к проблеме экранирования шума плоским полигональным экраном. Во втором разделе будет описана экспериментальная установка по исследованию экранирования вращающихся азимутальных мод, представлена адаптация ГТД к задаче расчета экранирования шума вращающихся азимутальных мод плоским полигональным экраном и проведено сравнение экспериментально измеренных и вычисленных диаграмм направленности для различных частот при наличии и отсутствии экрана.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ГТД

Причины выбора ГТД в качестве основного расчетного инструмента для исследования эффекта экранирования подробно рассматриваются в [9, 10, 12]. Здесь необходимо отметить, что основным достоинством ГТД является тот факт, что именно эта теория обеспечивает корректный расчет распределения амплитуды и фазы звуковой волны в ближнем поле [9, 10]. Более того, ГТД допускает непосредственное обобщение на случай плоских полигональных экранов, что было успешно экспериментально провалидировано в работах [13, 14].

Согласно основным положениям ГТД [15–17] полное звуковое поле P_T , излучаемое точечным монопольным источником, в произвольной точ-

ке наблюдения является суммой геометроакустического P_G и дифрагированного P_D звуковых полей:

$$P_T = P_G + P_D, \quad (1)$$

и зависит от частоты падающего звукового поля, положения источника, положения экрана и точки наблюдения. В общем случае геометроакустическое поле P_G , в зависимости от точки наблюдения, является суммой падающей и отраженной волн, а дифрагированное поле P_D зависит от комплексной амплитуды падающей волны в точке рассеяния и дифракционного коэффициента, который в рассматриваемом случае определяется из решения канонической задачи дифракции звука на акустически жесткой бесконечно тонкой полуплоскости [15].

Соотношение (1), с учетом явного вида выражений для геометроакустического поля и дифракционного коэффициента [15–17], является функцией Грина для задачи дифракции звука на акустически абсолютно жесткой бесконечной полуплоскости. Тогда пренебрегая вкладом высших порядков теории дифракции [13] и рассеянием звука на вершинах экрана [18] выражение (1) можно обобщить на случай полигональных экранов, что позволяет построить приближенную функцию Грина для задачи дифракции звука на экране рассматриваемой геометрии [14].

Экспериментальная валидация ГТД для задачи дифракции звука на прямоугольном экране с помощью метода последовательностей максимальной длины была выполнена в работе [13], а в работе [14] также с помощью метода последовательностей максимальной длины была проведена валидация ГТД на случай трехмерной (3D) модели планера самолета интегральной компоновки и имитирующего ее плоского полигонального экрана.

Детальный анализ расчетных и экспериментальных данных, выполненный в работе [14], выявил хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных для рассмотренных положений микрофона относительно экранирующей поверхности в различных точках наблюдения: в освещенной зоне, в зоне геометрической тени, а также в зоне полутени. Полученные в [13, 14] результаты подтвердили выводы о корректности использования ГТД для расчета эффективности экранирования авиационных некомпактных источников шума при дифракции звука на плоских полигональных экранах.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЗВУКОВЫХ МОД

Рассмотрим экранирование вращающихся звуковых мод, излучаемых из круглого цилиндрического канала. Данная задача актуальна при исследовании экранирования шума вентилятора,

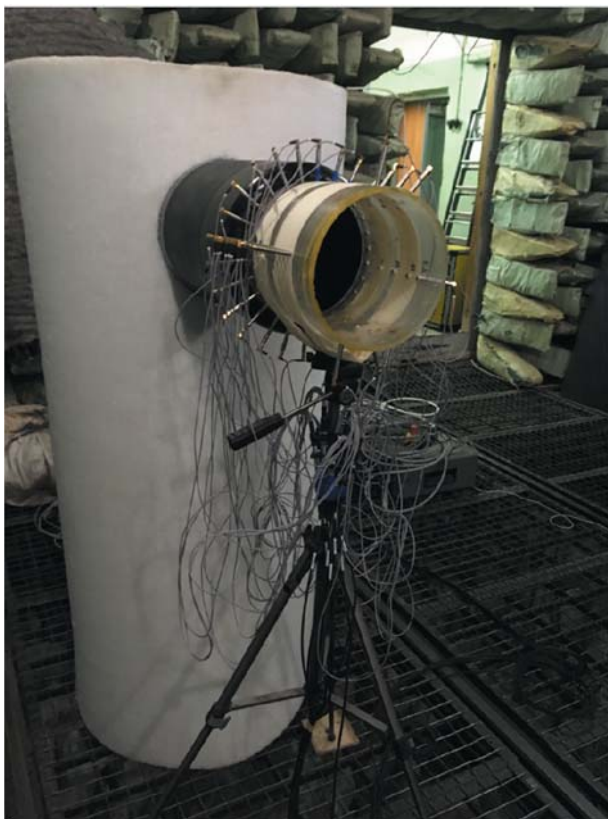
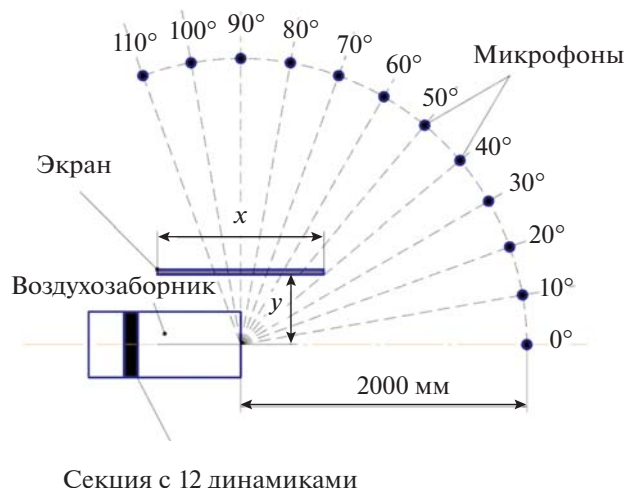


Рис. 1. Стенд для настройки системы генерации вращающихся мод с установленной 48-микровфонной решеткой.

излучаемого из канала воздухозаборника авиадвигателя. При анализе излучения звука из канала воздухозаборника важно, что звуковое поле в канале описывается в терминах суперпозиции отдельных звуковых мод, каждая из которых характеризуется азимутальным (m) и радиальным (n) числами и на каждой частоте обладает индивидуальным осевым волновым числом. При отсутствии импедансных облицовок стенок канала число звуковых мод, распространяющихся без затухания в реальных каналах воздухозаборников современных авиадвигателей, исчисляется несколькими сотнями, причем вентилятор двигателя генерирует на гармониках роторных частот всю совокупность распространяющихся мод. При этом каждая из распространяющихся звуковых мод обладает индивидуальной диаграммой направленности при излучении из канала. Указанные обстоятельства существенно осложняют описание эффекта экранирования звука, излучаемого из воздухозаборника двигателя.

Экспериментальные исследования экранирования отдельных вращающихся звуковых мод проводились в акустической камере АК-2 с применением маломасштабной модели воздухозаборника [19], представлявшей собой круглый цилин-



Секция с 12 динамиками

Рис. 2. Схема стенда для измерения эффекта экранирования азимутальных мод, излучаемых из круглого безфланцевого канала.

дрический канал с расположенными в стенках 12 динамиками, которые с помощью специальной настройки позволяли генерировать отдельную звуковую моду, которая и излучалась из канала.

Экспериментальное исследование проходило в два этапа: на первом этапе с помощью 48-микровфонной решетки (рис. 1) производилась настройка динамиков на генерацию отдельной звуковой моды, а на втором этапе устанавливалась прямоугольная экранирующая пластина и выполнялось исследование экранирования сгенерированных звуковых мод при различных положениях экрана (рис. 2). В качестве экрана использовалась выполненная из композитного материала прямоугольная пластина размером $1500 \times 1000 \times 12$ мм. Смещение экрана вдоль оси x канала измерялось в долях длины экрана ($L = 1000$ мм) и проводилось относительно задней кромки экрана, а смещение в перпендикулярном направлении y измерялось в диаметрах канала воздухозаборника ($D = 300$ мм).

Настройка [19] генерации звукового поля в канале позволяла сгенерировать одну азимутальную моду с фиксированным азимутальным числом, являющуюся суперпозицией звуковых мод с различными радиальными числами, амплитуда которой превосходит амплитуду других азимутальных мод на 15–25 дБ. Например, на частотах 4248 и 4800 Гц это реализовывалось для азимутальных чисел $0 \leq m \leq 6$. При этом для азимутальных чисел $4 \leq m \leq 6$ распространяются моды только с одним радиальным числом $n = 0$, и поэтому в данных случаях в канале реализовывался одномодовый режим распространения звука.

Рассмотрим далее расчет излучения отдельной звуковой моды из канала воздухозаборника при наличии и отсутствии экрана. Точное решение

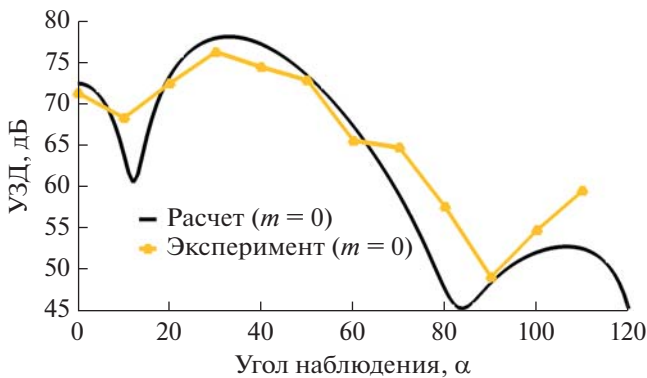


Рис. 3. Сравнение диаграмм направленности для поршневой моды ($n = 0, m = 0$) на частоте 4248 Гц при отсутствии экрана.

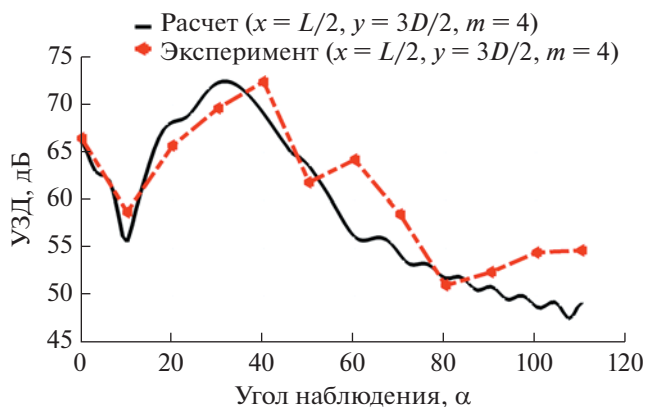


Рис. 4. Сравнение диаграмм направленности для звуковой моды ($n = 0, m = 4$) на частоте 4800 Гц с установленным экраном.

задачи излучения из круглого цилиндрического безфланцевого канала для различных азимутальных мод было получено Вайнштейном [20]. Однако, поскольку воздухозаборник рассматривается как некомпактный источник, то использование при расчетах асимптотики дальнего поля для решения Вайнштейна неприемлемо. Поэтому для расчета эффективности экранирования излучаемых из цилиндрического канала звуковых мод использовалась интегральная теорема Кирхгофа [21] в виде:

$$P(\mathbf{r}_0, \omega) = \int_S \left(G(\mathbf{r}_0, \mathbf{x}_s, \omega) \frac{\partial P_{nm}(\mathbf{x}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}} - P_{nm}(\mathbf{x}_s, \omega) \frac{\partial G(\mathbf{r}_0, \mathbf{x}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}} \right) d\mathbf{x}_s, \quad (2)$$

где S — поверхность Кирхгофа, \mathbf{r}_0 — радиус-вектор точки наблюдения, \mathbf{n} — внешняя нормаль к поверхности Кирхгофа, $G(\mathbf{r}_0, \mathbf{x}_s, \omega)$ и $\frac{\partial G(\mathbf{r}_0, \mathbf{x}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}}$ — функция Грина и ее производная по нормали к по-

верхности Кирхгофа для рассматриваемой краевой задачи соответственно, $P_{nm}(\mathbf{x}_s, \omega)$ и $\frac{\partial P_{nm}(\mathbf{x}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}}$ — значения звукового давления и его первой производной по нормали на поверхности Кирхгофа для звуковой моды с номерами m и n .

В данном случае в качестве функции Грина $G(\mathbf{r}_0, \mathbf{x}_s, \omega)$ использовалось полученное в рамках ГТД выражение (1) и его первая производная по координатам точки источника, а значения давления и его первой производной на поверхности Кирхгофа вычислялись на основе точного решения [20]. В качестве поверхности Кирхгофа использовалась цилиндрическая поверхность, полностью охватывающая исследуемый канал. Такой подход позволил получить корректное распределение амплитуды и фазы звукового поля в непосредственной близости от экрана, что является необходимым условием при расчете эффективности экранирования.

Итак, используя выражения (1) и (2) для исследованных в экспериментах частот, звуковых мод и положений экрана был проведен сравнительный анализ распределения звука в дальнем поле. На рис. 3 представлено сравнение вычисленной и экспериментально измеренной диаграмм направленности излучения поршневой моды ($m = 0, n = 0$) на частоте 4248 Гц при отсутствии экрана. Видно, что в данном случае для углов наблюдения менее 90° имеет место хорошее качественное и количественное совпадение между расчетной кривой и экспериментальными точками. Для углов наблюдения свыше 90° имеет место расхождение между зависимостями, достигающее 7 дБ для угла наблюдения 110° .

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными при наличии экрана, установленного в положении ($x = L/2, y = 3D/2$), представлено на рис. 4, где изображены зависимости для звуковой моды ($m = 4, n = 0$), излучаемой на частоте 4800 Гц. В данном случае для углов наблюдения менее 50° имеет место хорошее качественное совпадение между расчетными и экспериментальными зависимостями. Однако при увеличении угла наблюдения отчетливо видны различия между зависимостями, достигающие 8.5 и 5.5 дБ для углов наблюдения 50° и 110° градусов соответственно.

Детальный сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных показал, что наиболее близкие значения для всех рассмотренных азимутальных мод наблюдаются в случае отсутствия экрана, а также при минимальном расстоянии от кромки воздухозаборника до кромки экрана. При увеличении расстояния от кромки воздухозаборника до передней кромки экрана хорошее качественное и количественное совпадение между расчетными и экспериментальными кривыми

наблюдалось преимущественно в передней полусфере (диапазон углов от 0° до 50° градусов). В задней полусфере, где амплитуда звукового поля мала, различие между кривыми достигало 6–14 дБ в зависимости от номера звуковой моды и положения экрана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований дифракции звука, излучаемого из круглого цилиндрического канала в приложении к задаче экранирования шума авиационных силовых установок. Результаты, полученные в данной работе, будут развиваться в дальнейшем с целью последующего использования для разработки методов расчета снижения шума на местности для самолетов, реализующих эффект экранирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-БРИКС (№ 19-51-80002). Авторы выражают благодарность участникам консорциума проекта “IENA” Julio Cordioli и Chen Bao за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Von Glahn U., Goodykoontz J., Wagner J.* Nozzle Geometry and Forward Velocity Effects on Noise for CTOL Engine-Over-The-Wing Concept // NASA TM-X-71453, Oct. 1973.
2. *Von Glahn U., Groesbeck D., Reshotko M.* Geometry Considerations for Jet Noise Shielding with CTOL Engine-Over-The-Wing Concept // AIAA Paper 1974–568.
3. *Von Glahn U., Groesbeck D., Wagner J.* Wing Shielding of High-Velocity Jet and Shock – Associated Noise with Cold and Hot Flow Jets // AIAA Paper 1976–547.
4. *Liebeck R.H.* Design of the Blended Wing Body Subsonic Transport // J. Aircraft. 2004. V. 41. № 1.
5. *Burley C.L., Brooks T.F., Hutcheson F.V., Doty M.J., Lopes L.V., Nickol C.L., Vicroy D.D., Pope D.S.* Noise scaling and community noise metrics for the hybrid wingbody aircraft // AIAA Paper 2014–2626.
6. *Broadbent E.G.* Noise Shielding for Aircraft // Prog. Aerospace Science. 1977. V. 17. P. 231–268.
7. *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.
8. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Новая корреляционная модель каскада турбулентных пульсаций как источник шума в струях // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 482–497.
9. *Ostrikov N.N., Denisov S.L.* Airframe Shielding of Noncompact Aviation Noise Sources: Theory and Experiment // AIAA Paper 2015–2691.
10. *Ostrikov N.N., Denisov S.L.* Mean Flow Effect On Shielding Of Noncompact Aviation Noise Sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 30 May–1 June, 2016. AIAA Paper 2016–3014.
11. *Денисов С.Л., Остриков Н.Н.* Особенности снижения шума с авиационных силовых установок с помощью эффекта экранирования // Труды III-й Всероссийской Акустической конференции, г. Санкт-Петербург, 21–24 сентября, 2020. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 585–588.
12. *Vychkov O.P., Faranosov G.A., Denisov S.L., Ostrikov N.N.* Theoretical modeling of the excess noise due to jet-wing interaction // AIAA Paper 2016–2932. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016.
13. *Денисов С.Л., Корольков А.И.* Исследование экранирования шума с помощью метода последовательностей максимальной длины в приложении к задачам авиационной акустики // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 4. С. 1–17.
14. *Денисов С.Л., Остриков Н.Н., Панкратов И.В.* Исследование возможности замены планера самолета интегральной компоновки на плоский полигональный экран для оценки эффективности экранирования шума двигателей на основе геометрической теории дифракции // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 6. С. 620–631.
15. *Keller J.B.* Geometrical Theory of Diffraction // J. Opt. Soc. Am. 1962. V. 52. № 2. P. 116–130.
16. *Kouyoumjian R.G., Pathak P.H.* A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface // Proceedings of the IEEE. 1974. V. 62. № 11.
17. *Боровиков В.А., Кинбер В.Е.* Геометрическая Теория Дифракции. М.: Связь, 1978. 248 с.
18. *Babich V.M., Dementev D.B., Samokish B.A., Smyshlyaev V.P.* On evaluation of the diffraction coefficients for arbitrary “nonsingular” directions of a smooth convex cone // SIAM J. Appl. Math. 2000. V. 60. P. 536–573.
19. *Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Яковец М.А., Ипатов М.С., Кругляева А.Е., Сидоров С.Ю.* Излучение звука из открытого конца канала, моделирующего воздухозаборник авиадвигателя в статический условиях и в потоке // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 1. С. 59–73.
20. *Вайнштейн Л.А.* Теория дифракции и метод факторизации. М.: Советское радио, 1966. 432 с.
21. *Шендеров Е.Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 352 с.