ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К ПРОБЛЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ НЕКОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ШУМА

С.Л. Денисов, Н.Н. Остриков
ФАУ «ЦАГИ», Акустическое отделение, г. Москва,
aeroacoustic@tsagi.ru

Проблема снижения шума самолётов на местности с помощью эффекта экранирования шума силовой установки элементами конструкции планера самолёта является объектом активных исследований с середины 70-хх годов 20 века. В работах [1,2] были выполнены первые экспериментальные исследования снижения шума струи, а в работе [3] снижение шума вентилятора посредством использования различных элементов планера с качестве акустических экранов, призванных снизить звуковое воздействие силовой установки на шум в дальнем поле.

Дальнейшие исследования [4,5] показали, что расчёт эффективности экранирования авиационных некомпактных источников шума является сложной мультидициплинарной задачей, которая существенно зависит как от моделей, описывающих непосредственно источники шума, так и методов расчёта распространения звука от данных источников при наличии экранирующих поверхностей (в литературе такие методы расчёта называются методами теории дифракции). Как показано в работе [4], для корректного расчёта эффективности экранирования особенно важным фактором является распределение фазы звукового поля в непосредственной близости от экранирующей поверхности, поскольку именно оно отвечает за формирование распределение амплитуды в дальнем поле, где расположен наблюдатель.

Активные исследования [6] различных теорий дифракции показали, что наилучшую применимость к задачам расчёта эффективности экранирования авиационных некомпактных источников шума имеет Геометрическая Теория Дифракции (ГТД), которая не только обеспечивает корректный расчёт распределение фазы вблизи от экранирующей поверхности, но и допускает обобщение

на случай экранов сложной формы (например, плоских полигональных экранов, моделирующих планер самолёта), а также обобщается на случай источников сложной природы (монополь, диполь, квадруполь) и случай наличия спутного воздушного потока, что существенно расширяет её применимость в задачах аэроакустики.

Тем не менее, обобщение ГТД на случай экранов более сложной формы, более детально моделирующих геометрию планера самолёта, является достаточно сложной задачей, особенно при расчёте дифрагированного поля в зоне тени в зоне полутени.

Для преодоления этой проблемы целесообразно использовать различные численные методы расчёта распространения и рассеяния звука. В качестве таких методов наибольшее распространение получили Метод Конечных Элементов (МКЭ) [7] и Метод Граничных Элементов (МГЭ) [8]. Каждый из этих методов имеет свои сильные и слабые стороны, обсуждение которых можно найти, например, в [9], однако для дальнейшей реализации метода численного расчёта распространения звука при наличии экранирующей поверхности нами был выбран МКЭ, поскольку в [10] уже было продемонстрировано успешное применение МКЭ к задаче распространения звука в прямоугольном канале как при наличии спутного воздушного потока, так и при его отсутствии.

Здесь необходимо отметить, что развитие численных методов, МКЭ в частности, не является заменой методов ГТД. Скорее наоборот, МКЭ дополняет ГТД, уточняя различные аспекты распространения звука, особенно при его рассеянии на элементах конструкции, которые не могут быть описаны в рамках решения канонических задач дифракции. В совокупности это позволяют на раннем этапе проектирования летательного аппарата с помощью ГТД описать распределение звукового поля при рассеянии на элементах планера, вносящих основной вклад в формирование дифракционной картины в зоне тени, что позволяет выбрать наилучшие компоновки с точки зрения реализации эффекта экранирования. А затем, с помощью МКЭ, уточнить расчёт распределение звука в зоне тени посредством более корректного учёта геометрии планера, что позволит выявить наилучшие компоновочные решения с точки зрения снижения шума самолёта на местности.

В данной работе представлены результаты разработки МКЭ в постановке Бубнова-Галеркина ориентированного, прежде всего,

на решение задачи расчёта экранирования авиационных некомпактных источников шума. Для построения расчётной геометрии реализовано использование свободно распространяемого сеткопостроителя GMSH [11], а библиотека конечных элементов состоит линейных и квадратичных прямоугольных и треугольных элементов. Для реализации безотражательных граничных условий используется метод PML — Perfectly Matched Layers [8], который также реализован на базе сеткопостроителя GMSH.

На рисунке 1 представлен пример расчёта с помощью разработанного МКЭ распределения действительной (слева) и мнимой (справа) частей звукового поля при излучении звука точечным монопольным источником на частоте 1 кГц с помощью квадратичных прямоугольных конечных элементов.

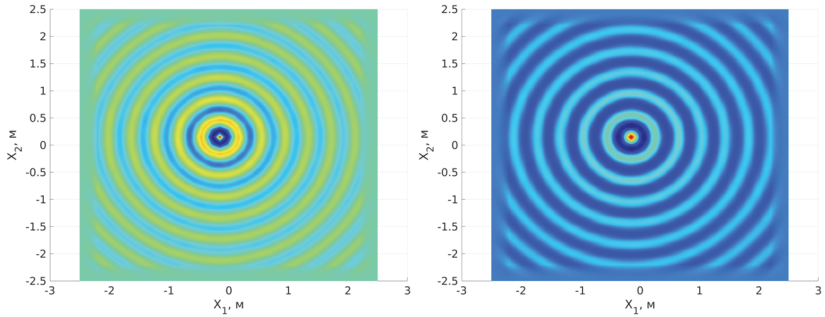

Рис. 1. Пример расчёта распределения звукового поля точечного монопольного источника с помощью МКЭ: слева — действительная часть, справа — мнимая часть

Верификация разработанного МКЭ на задачах дифракции звука на полосе и на прямоугольном экране продемонстрировали хорошее согласие с результатами расчётов, выполненных с помощь точного решения в первом случае и с помощью ГТД во втором случае. Валидация расчётов с результатами экспериментов по рассеянию звука на прямоугольном экране [12] в частотном представлении также показали хорошее качественное и количественное совпадение. Таким образом, разработанный МКЭ допускает дальнейшее развитие на случай исследования задач по дифракции звука в приложении к исследованию проблемы экранирования авиационных некомпактных источников шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 21-71-30016).

Литература

1. U. Von Glahn, D. Groesbeck, and M. Reshotko. Geometry Considerations for Jet Noise Shielding with CTOL Engine-Over-The-Wing Concept. AIAA Paper 74-568, June 1974.
2. U. Von Glahn, D. Groesbeck, and J. Wagner. Wing Shielding of High-Velocity Jet and Shock – Associated Noise with Cold and Hot Flow Jets. AIAA Paper 76-547, July 1976.
3. Hellstrom G. Noise shielding aircraft configurations, a comparison between predicted and experimental results // 1973. P. 730-740.
4. N.N. Ostrikov, S.L. Denisov. Airframe Shielding of Noncompact Aviation Noise Sources: Theory and Experiment. AIAA Paper 2015 – 2691, June 2015.
5. 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.
6. E.G. Broadbent. Noise Shielding for Aircraft. Prog. Aerospace Sci., Vol.17, pp. 231-268, 1977.
7. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. The Finite Element Method. Vol. 1: Solid Mechanics. Fifth edition published by Butterworth/Heinemann. 2000
8. S. Marburg, B. Nolte. Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids — Finite and Boundary Element Methods. DOI 10.1007/978-3-540-77448-8.
9. N. Atalla, F. Sgard. Finite Element Methods in Structural Acoustics and Vibration. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2015.
10. S.L. Denisov, N.N. Ostrikov, M.A. Yakovets, M.S. Ipatov. Investigation of Sound Propagation in Rectangular Duct with Transversally Non-uniform Flow and Anisotropic Wall Impedance by Asymptotic Theory and 3D Finite Element Method // AIAA Paper 2019-2640, 2019.
11. C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh: A 3D Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-Processing Facilities // Int. J. Numer. Methods Eng. 79 (11), 1309–1331 (2009).
12. Денисов С.Л., Корольков А.И. Исследование экранирования шума с помощью метода последовательностей максимальной

длины в приложении к задачам авиационной акустики // Акустический журнал, 2017, Т. 63. № 4. С. 419-435.