

УДК: 534.32
OECD: 1.03.AA

Об экранировании шума винтомоторных силовых установок элементами планера

Мошков П.А.

К.т.н, ведущий инженер-конструктор, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), г. Москва, РФ

Аннотация

При интеграции винтомоторной силовой установки в компоновке летательного аппарата могут появляться аэроакустические эффекты, которые могут приводить как к снижению, так и к увеличению общего уровня шума летательного аппарата на местности. Одним из перспективных методов снижения шума на местности является экранирование шума силовой установкой элементами планера. В работе рассмотрено современное состояние данного вопроса на основе анализа доступных публикаций. Использование в экспериментах точечных всенаправленных источников шума приводит к завышению оценки снижения шума воздушного за счет экранирования. Показано, что эффект снижения шума воздушного винта за счет экранирования может быть нивелирован аэродинамической интерференцией винт-крыло. При проектировании винтовых летательных аппаратов самолетного типа, в первую очередь, необходимо ориентироваться на хорошо изученные технологии снижения шума как изолированных источников, так и установочных эффектов.

Ключевые слова: воздушный винт, шум воздушного винта, шум двигателя, экранирование шума, шум на местности, технологии снижения шума, аэроакустика.

About noise shielding of propeller-driven power plants by airframe elements

Moshkov P.A.

PhD, leading engineer-designer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract

When integrating a propeller-driven power plant in the layout of an aircraft, aeroacoustics effects may appear, which can lead to both a decrease and an increase in the overall community noise level of the aircraft. One of the promising methods of community noise reduction is noise shielding by the power plant with airframe elements. The paper considers the current state of this issue based on the analysis of available publications. The use of point omnidirectional noise sources in experiments leads to an overestimation of the air noise reduction due to shielding. It is shown that the effect of reducing the noise of the propeller due to shielding can be offset by aerodynamic interference of the propeller-wing. When designing propeller-driven fixed-wing aircraft, first of all, it is necessary to focus on well-studied noise reduction technologies for both isolated sources and installation effects.

Keywords: *propeller, propeller noise, engine noise, noise shielding, community noise, noise reduction technologies, aeroacoustics.*

Введение

Проблема снижения шума на местности винтовых летательных аппаратов самолетного типа является актуальной как для легких винтовых самолетов (ЛВС) [1], так и для винтовых беспилотных воздушных судов (БВС) самолетного типа [2]. Предельно допустимые уровни шума на местности ЛВС нормируются в соответствии со стандартом ИКАО [3, 4]. Международных норм, регламентирующих предельно допустимые уровни шума на местности винтовых БВС самолетного типа, в настоящее время не разработано, и низкие уровни шума таких аппаратов являются, в первую очередь, их конкурентным преимуществом [5]. Для дальнейшего снижения шума винтовых летательных аппаратов рассматриваются новые аэродинамические компоновки, обеспечивающие, так называемый, эффект экранирования шума силовой установки элементами планера [6].

Первоначально проблемой экранирования шума силовой установки элементами планера начали заниматься с целью поиска эффективного способа снижения шума реактивной струи двигателя. Этим вопросам было посвящено значительное количество исследований [7–9]. Считалось, что за счет рассеяния шума струи на элементах планера можно добиться существенного снижения шума летательного аппарата (ЛА) на местности. Выполненные в последнее время расчетные [10, 11] и экспериментальные исследования [12, 13] показали, что реальная эффективность экранирования существенно ниже заявленных ранее значений, но тем не менее снижение шума на местности при помощи эффекта экранирования потенциально возможно, хотя и является сложной многофакторной задачей, существенно зависящей от типа силовой установки и аэродинамической компоновки воздушного судна.

Целью работы является анализ проблемы экранирования шума винтомоторных силовых установок элементами планера.

1. Анализ работ по проблеме экранирования шума винтомоторных силовых установок

В работе [14] при исследовании экранирования шума малоразмерного винта было установлено, что тональному и широкополосному шуму свойственны различные типы экранирования. Экранирование тонального шума носит нерегулярный характер и может привести как к снижению шума тональных гармоник, так и к его усилению в зависимости от номера гармоники, угла наблюдения и расстояния между экраном и законцовкой винта. В отличие от тонального шума, экранирование широкополосного шума имеет достаточно высокую эффективность, которая слабо зависит от расстояния между экраном и законцовкой винта. Было показано, что эффект экранирования существенным образом зависит от характеристик источника звука. При использовании реального винта, который является некомпактным источником [15], аэродинамическая интерференция винта и крыла приводит к дополнительному излучению звука и эффект экранирования в таком случае становится несущественным.

В эксперименте [16] шум воздушного винта БВС Skywalker X8 (рис. 1) моделировался точечным вращающимся источником шума. На рис. 2 представлено сравнение характеристик направленности первой и второй гармоник шума винта (SPL – уровень звукового давления гармоники) при наличии и отсутствии экранирующей поверхности. Для первой гармоники шума вращения винта эффект снижения шума за счет наличия экранирующей поверхности достигает 13 дБ в задней полусфере в направлении 130°. Для второй гармоники наибольший эффект наблюдается в плоскости вращения винта (90°) и достигает 15 дБ.

Отметим также, что в работе [16] шум воздушного винта моделировался при помощи вращающегося источника. При работе реального винта в следе, а также вблизи экранирующей поверхности эффект экранирования может быть существенно меньшим за счет аэродинамической интерференции «винт-турбулентный след за фюзеляжем» и «винт-экранирующая поверхность». В работе [16] также не отмечено расстояние, для которого получены графики на рис. 2.



Рис. 1. BVC Skywalker X8 без экранирующей (а) и с экранирующей (б) поверхностями [16]

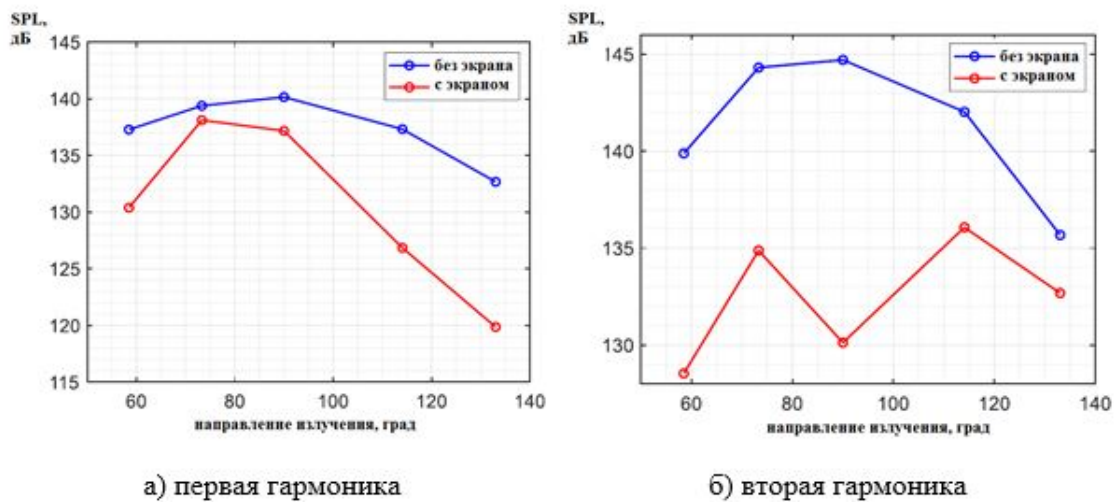


Рис. 2. Характеристики направленности первых двух гармоник шума винта при наличии и отсутствии экранирующей поверхности [16]

В работах [17, 18] представлены результаты исследования эффективности экранирования точечного настроенного источника и реального воздушного винта крылом. В эксперименте использовалось крыло с хордой 24,5 см и длиной 123 см с аэродинамическим профилем НАСА34-008А. Было рассмотрено три режима работы воздушного винта Airscrew E-MA1260T (рис. 3) в статических условиях, характеризуемых различной частотой вращения (n) 4400, 7000 и 7600 об/мин. Привод воздушного винта осуществлялся с помощью электродвигателя Kontronik PYRO 700-45. В качестве

точечного настроенного источника шума использовался миниатюрный всенаправленный источник QindW, разработанный компанией Qsources (рис. 3). При испытаниях генерировался белый шум в диапазоне частот 500-6300 Гц.

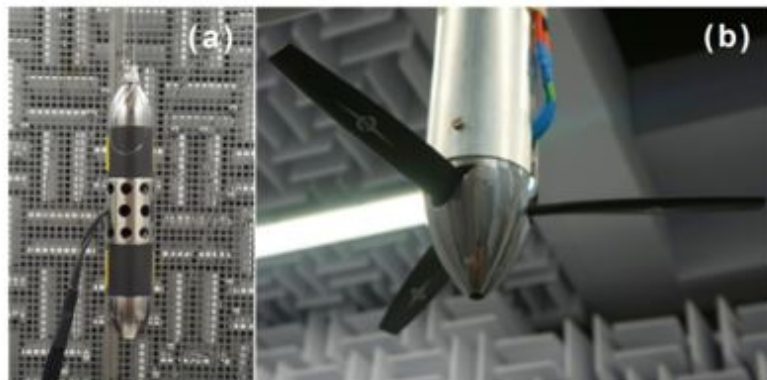


Рис. 3. Всенаправленный источник шума (а) и воздушный винт (b), используемые в эксперименте [17, 18]

Схема проведения данного эксперимента рассмотрена на рис. 4. Измерения уровней звукового давления выполнялись с применением 64-х микрофонной решетки 40РН ССР (TU Delft).



Рис. 4. Схема проведения эксперимента при исследовании экранирования шума воздушного винта крылом [17, 18]

Результаты оценки влияния экранирующей поверхности на суммарные уровни шума (OASPL), измеряемые в различных контрольных точках микрофонной решетки, представлены на рис. 5. Эффективность экранирования оценивается как разность суммарных уровней звукового давления, измеренных на микрофонах решетки с координатами (x, y) при работе винта или источника без экранирующей поверхности и при ее установке. Минус на цветовой шкале указывает на снижение шума при наличии экранирующей поверхности. Координата $y = 0$ соответствует плоскости вращения винта или центру источника шума и микрофонной решетки.

Можно видеть, что только при пониженном режиме работы винта ($n=4400$ об/мин) в статических условиях наблюдается снижение суммарного уровня шума винта на величину до 3,7 дБ (рис. 5а), при этом в некоторых точках наблюдается увеличение суммарного уровня шума до 0,9 дБ. При частотах вращения воздушного винта 7000 и

7600 об/мин не наблюдается снижения уровней звукового давления за счет экранирования шума винта крылом (рис. 5 б и в), в некоторых контрольных точках наблюдается увеличение суммарных уровней шума винта на величину до 3 дБ.

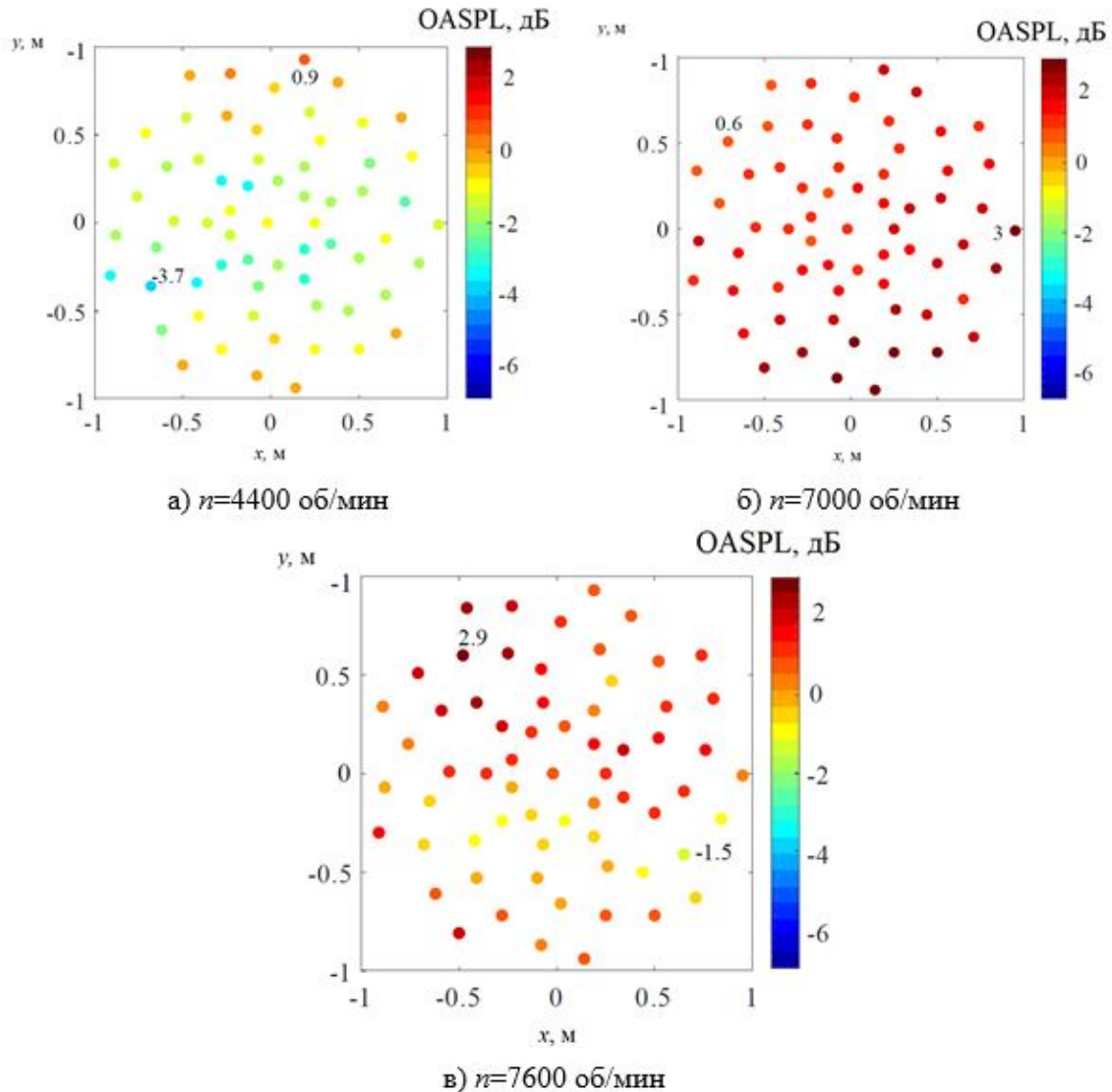


Рис. 5. Экспериментально полученные оценки влияния экранирования шума винта крылом на суммарные уровни звукового давления (OASPL) при работе винта в статических условиях (расстояние между крылом и винтом 0,9 м) [18]

При расположении вместо воздушного винта настроенного источника шума можно наблюдать снижение шума на величину до 6 дБ за счет экранирования (рис. 6).

Дополнительно в работе [18] было показано, что на эффективность экранирования шума винта, расположенного над крылом, существенным образом влияет форма передней кромки крыла.

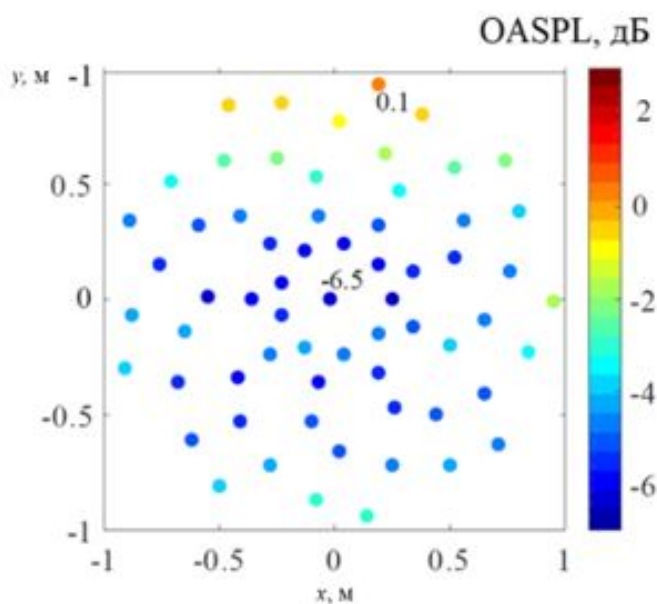


Рис. 6. Экспериментально полученные оценки эффективности экранирования шума генерируемого всенаправленным источником (OASPL) (расстояние между крылом и всенаправленным источником звука 0,9 м) [18]

2. О расчете экранирования шума винтомоторных СУ элементами планера

Среди расчетных методов, применяемых в настоящее время для учета эффекта экранирования при оценке шума на местности, отметим: геометрическая теория дифракции [19, 20], метод трассировки лучей [21] (ray tracing method), метод граничных элементов (boundary element method – BEM), метод эквивалентного источника (equivalent source method), методы Френеля и Кирхгофа и полуэмпирический метод барьерного экранирования (barrier shielding method – BSM) [22, 23].

При выполнении расчетных и экспериментальных исследований экранирования шума винтомоторных силовых установок элементами планера целесообразно получать следующие оценки:

- Зависимости суммарного уровня шума и отдельных тональных и широкополосных составляющих излучения воздушного винта и поршневого двигателя от угла наблюдения (диаграммы направленности) для различных положений экрана относительно элементов силовой установки для различных режимов полета;
- Оценка уровней пролетного шума ЛА в специализированном программном обеспечении [24–28] с учетом рассеяния шума силовой установки на элементах планера.

Заключение

Одним из перспективных методов снижения шума ЛВС и БВС на местности является экранирование шума винтомоторной СУ элементами планера. Параметрических зависимостей, описывающих влияние различных параметров, в первую очередь, относительных геометрических размеров, на снижение шума за счет эффекта экранирования в настоящее время в литературе не представлено.

На основе анализа доступных публикаций можно констатировать, что эффект экранирования существенным образом зависит от характеристик источника звука. При использовании реального винта, который является некомпактным источником,

аэродинамическая интерференция винта и крыла приводит к дополнительному излучению звука, что существенным образом снижает эффективность экранирования шума винта, демонстрируемую при использовании расчетов и экспериментов с использованием точечных источников звука.

В настоящее время вопросы экранирования акустического излучения винтовых движителей и поршневых двигателей являются малоизученными и требуют значительного количества специальных расчетных и экспериментальных исследований. При проведении экспериментов с заменой реального воздушного винта источником шума можно получить завышенные оценки снижения шума за счет экранирования.

Поэтому при проектировании винтовых ЛА самолетного типа, в первую очередь, следует учитывать хорошо изученные технологии снижения шума, как в источнике (воздушный винт, двигатель и планер), так и при интеграции силовой установки в компоновке ЛА [29].

Список литературы

1. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустика легких винтовых самолетов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 3. С. 3-12.
2. Мошков П.А. Исследование слышимости и маскировки шума винтового беспилотного воздушного судна фоном окружающей среды // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 28-38.
3. Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Montreal. Canada. ICAO. 2011. Vol. 1 Aircraft Noise. 227 p.
4. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft, Akustika. 2019. Vol. 34. pp. 68–73.
5. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A., Bolun C. The problems of selecting the power plant for light propeller-driven aircraft and unmanned aerial vehicle taking into account the requirements for community noise // Akustika. 2021. Vol. 39. pp. 164–169.
6. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. Engine-propeller power plant aircraft community noise reduction key methods // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No. S9. pp. 8601–8606.
7. Von Glahn U., Groesbeck D., Reshotko M. Geometry considerations for jet noise shielding with CTOL engine-over-the-wing concept // 7th Fluid and Plasma Dynamics Conference. 1974. AIAA Paper 74–568. DOI: 10.2514/6.1974-568
8. Von Glahn U., Groesbeck D., Wagner J. Wing shielding of highvelocity jet and shock-associated noise with cold and hot flow jets // 3rd Aeroacoustics Conference. 1976. AIAA Paper 76-547. DOI: 10.2514/6.1976-547
9. Maekawa Z. Noise Reduction by Screens // Journal of Applied Acoustics. 1968. Vol. 1. pp. 157–173.
10. Papamoschou D. Prediction of jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010. AIAA Paper No. 2010–653. DOI: 10.2514/6.2010-653
11. Colas D.F., Spakovszky Z. A turbomachinery noise shielding framework based on the modified theory of physical optics // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2013. AIAA Paper No. 2013–2136. DOI: 10.2514/6.2013-2136
12. Papamoschou D., Mayoral S. Experiments on shielding of jet noise by airframe surface // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference). AIAA Paper 2009–3326. 2009. DOI: 10.2514/6.2009-3326

13. Mayoral S., Papamoschou D. Effects of source redistribution on jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. AIAA. Paper 2010-652. 2010. DOI: 10.2514/6.2010-652
14. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: Theory and experiment // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2015. DOI: 10.2514/6.2015-2691
15. Merino-Martínez, R., Sijtsma, P., Carpio, A.R., Zamponi R., Luesutthiviboon S., Malgoezar A.M.N., Snellen M, Schram, C., Simons, D.G. Integration methods for distributed sound sources // International Journal of Aeroacoustics. 2019. Vol. 18. No. 4-5. pp. 444-469. DOI: 10.1177/1475472X19852945
16. Shim Y.M., Kingan M., Go S.T., Jung R., McKay R., Doolan C., Yauwenas., Jiang., Tan J., Croaker P., Verstraete D., MacNiel R., Skvortsov A. Noise reduction methods for a fixed wing UAV // QUIET DRONES International e-Symposium on UAV/UAS Noise, 2020, 8 p.
17. Vieira A., Malgoezar A., Snellen M., Simons D.G. Experimental study of shielding of propeller noise by a wing and comparison with model predictions // Euronoise-2018. 2018. pp. 237-244.
18. Vieira A., Snellen M., Malgoezar A.M.N., Merino-Martinez R., Simons D.G. Analysis of shielding of propeller noise using beamforming and predictions // The Journal of the Acoustical Society of America. 2019. Vol. 146. No. 2. pp. 1085-1098. DOI: 10.1121/1.5121398
19. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016. DOI: 10.2514/6.2016-3014
20. Denisov, S.L., Ostrikov, N.N., Granich, V.Y. Problems of Aviation Power Plants Noise Reduction by Means of Shielding Effect // Acoustical Physics. 2021. Vol. 67. No. 3. pp. 293-297. DOI: 10.1134/S1063771021030027
21. Dewitte F.H.V. Aircraft Noise Shielding Assessment. The creation of a software tool to predict aircraft noise shielding. Master of Science Thesis. 2016. 93 p.
22. Vieira, A., Koch, M., Bertsch, L., Snellen, M., Simons, D.G. Simulation methodologies of engine noise shielding by wings within conceptual aircraft design // Journal of Aircraft. 2020. Vol. 57. No. 6. pp. 1202-1211.
23. Vieira, A., Snellen, M., Simons, D.G. Assessing the shielding of engine noise by the wings for current aircraft using model predictions and measurements // Journal of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 143. No. 1. pp. 388-398. DOI: 10.1121/1.5020798
24. Nöding, M., Bertsch, L. Application of noise certification regulations within conceptual aircraft design // Aerospace. 2021. Vol. 8. No. 8. P. 210 DOI: 10.3390/aerospace8080210
25. Bertsch L. et al. Comparative assessment of aircraft system noise simulation tools // Journal of Aircraft. 2021. Vol. 58. No. 4. pp. 867-884.
26. Bertsch, L., Snellen, M., Enghardt, L., Hillenherms, C. Aircraft noise generation and assessment: executive summary // CEAS Aeronautical Journal. 2019. Vol. 10. No. 1. pp. 3-9.
27. Rossignol, K.-S., Delfs, J.W., Moessner, M., Lummer, M., Yin, J.: Validation data for aircraft noise shielding prediction // CEAS Aeronaut. J. 2019. Vol. 10. pp. 179-196. DOI: 10.1007/s13272-019-00387-0
28. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф. Комплекс алгоритмов и программ для расчета шума самолетов на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 2. С. 137-157.
29. Мошков П.А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: дис... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2015. – 143 с.

References

1. Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Moshkov P.A. Acoustics of Light Propeller-Driven Aircraft // *Polyot*. – 2022. – № 3. – pp. 3–12.
2. Moshkov P.A. Study of the audibility and masking of the propeller-driven unmanned aerial vehicle noise by ambient noise // *Noise Theory and Practice*. – 2021. – Vol. 7. – № 2 (24). – pp. 28–38.
3. Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Montreal, Canada. ICAO. 2011. – Vol. 1 Aircraft Noise. – 227 p.
4. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft, *Akustika*. –2019. – Vol. 34. – pp. 68–73.
5. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A., Bolun C. The problems of selecting the power plant for light propeller-driven aircraft and unmanned aerial vehicle taking into account the requirements for community noise // *Akustika*. – 2021. – Vol. 39. – pp. 164–169.
6. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. Engine-propeller power plant aircraft community noise reduction key methods // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 12. – No. S9. – pp. 8601–8606.
7. Von Glahn U., Groesbeck D., Reshotko M. Geometry considerations for jet noise shielding with CTOL engine-over-the-wing concept // 7th Fluid and Plasma Dynamics Conference. – 1974. AIAA Paper 74–568. DOI: 10.2514/6.1974-568
8. Von Glahn U., Groesbeck D., Wagner J. Wing shielding of highvelocity jet and shock-associated noise with cold and hot flow jets // 3rd Aeroacoustics Conference. – 1976. AIAA Paper 76-547. DOI: 10.2514/6.1976-547
9. Maekawa Z. Noise Reduction by Screens // *Journal of Applied Acoustics*. – 1968. – Vol. 1. – pp. 157–173.
10. Papamoschou D. Prediction of jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – 2010. AIAA Paper No. 2010–653. DOI: 10.2514/6.2010-653
11. Colas D.F., Spakovszky Z. A turbomachinery noise shielding framework based on the modified theory of physical optics // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. –2013. AIAA Paper No. 2013–2136. DOI: 10.2514/6.2013-2136
12. Papamoschou D., Mayoral S. Experiments on shielding of jet noise by airframe surface // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference). AIAA Paper 2009–3326. – 2009. DOI: 10.2514/6.2009-3326
13. Mayoral S., Papamoschou D. Effects of source redistribution on jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – 2010. AIAA. Paper 2010–652. DOI: 10.2514/6.2010-652
14. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: Theory and experiment // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2015. DOI: 10.2514/6.2015-2691
15. Merino-Martínez, R., Sijtsma, P., Carpio, A.R., Zamponi R., Luesutthiviboon S., Malgoezar A.M.N., Snellen M, Schram, C., Simons, D.G. Integration methods for distributed sound sources // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2019. – Vol. 18. – No. 4-5. – pp. 444–469. DOI: 10.1177/1475472X19852945
16. Shim Y.M., Kingan M., Go S.T., Jung R., McKay R., Doolan C., Yauwenas., Jiang., Tan J., Croaker P., Verstraete D., MacNiel R., Skvortsov A. Noise reduction methods for a fixed wing UAV // *QUIET DRONES International e-Symposium on UAV/UAS Noise, 2020*, 8 p.
17. Vieira A., Malgoezar A., Snellen M., Simons D.G. Experimental study of shielding of propeller noise by a wing and comparison with model predictions // *Euronoise-2018*. – 2018. – pp. 237–244.

18. Vieira A., Snellen M., Malgoezar A.M.N., Merino-Martinez R., Simons D.G. Analysis of shielding of propeller noise using beamforming and predictions // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2019. – Vol. 146. – No. 2. – pp. 1085–1098. DOI: 10.1121/1.5121398
19. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3014>
20. Denisov, S.L., Ostrikov, N.N., Granich, V.Y. Problems of Aviation Power Plants Noise Reduction by Means of Shielding Effect // Acoustical Physics. – 2021. – Vol. 67. – No. 3. – pp. 293–297. DOI: 10.1134/S1063771021030027
21. Dewitte F.H.V. Aircraft Noise Shielding Assessment. The creation of a software tool to predict aircraft noise shielding. Master of Science Thesis. – 2016. – 93 p.
22. Vieira, A., Koch, M., Bertsch, L., Snellen, M., Simons, D.G. Simulation methodologies of engine noise shielding by wings within conceptual aircraft design // Journal of Aircraft. – 2020. – Vol. 57. – No. 6. – pp. 1202–1211.
23. Vieira, A., Snellen, M., Simons, D.G. Assessing the shielding of engine noise by the wings for current aircraft using model predictions and measurements // Journal of the Acoustical Society of America. – 2018. – Vol. 143. – No. 1. – pp. 388–398. DOI: 10.1121/1.5020798
24. Nöding, M., Bertsch, L. Application of noise certification regulations within conceptual aircraft design // Aerospace. – 2021. – Vol. 8. – No. 8. – pp. 210 DOI: 10.3390/aerospace8080210
25. Bertsch L. et al. Comparative assessment of aircraft system noise simulation tools // Journal of Aircraft. – 2021. – Vol. 58. – No. 4. – pp. 867–884.
26. Bertsch, L., Snellen, M., Enghardt, L., Hillenherms, C. Aircraft noise generation and assessment: executive summary // CEAS Aeronautical Journal. – 2019. – Vol. 10. – No. 1. – pp. 3–9.
27. Rossignol, K.-S., Delfs, J.W., Moessner, M., Lummer, M., Yin, J.: Validation data for aircraft noise shielding prediction. CEAS Aeronaut. J. – 2019. – Vol. 10. – pp. 179–196. DOI: 10.1007/s13272-019-00387-0
28. Dmitriev V.G., Samokhin V.F. Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise // TsAGI Science Journal. – 2014. – Vol. 45. – № 3-4. – pp. 367–388.
29. Moshkov P.A. Prediction and reduction of community noise of light propeller-driven aircraft. PhD Thesis. Moscow. MAI. – 2015. – 143 p.