

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОАКУСТИКИ ВИНТОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЁТНОГО ТИПА

**М.А. Погосян,  
П.А. Мошков**

Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)

Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва,  
125993, Российская Федерация

moshkov89@bk.ru

*Рассмотрена современная классификация источников шума винтовых летательных аппаратов самолётно-го типа. Сформулированы конкурентные уровни шума на местности для одно- и двухдвигательных проектируемых легких винтовых самолётов. Предложен подход к нормированию шума на местности винтовых беспилотных воздушных судов самолётно-го типа. Рассмотрены современные подходы к оценке шума винтовых летательных аппаратов самолётно-го типа на местности.*

**Ключевые слова:** аэроакустика; шум на местности; легкие винтовые самолёты; беспилотные воздушные суда; шум воздушного винта

### 1 Введение

На проблему шума на местности винтовых самолетов стали обращать внимание в начале 20-го века. Первая успешная модель генерации шума воздушным винтом была предложена советским ученым Гутиным Л.Я. в 1936 году [1], исследованию вихревой составляющей шума воздушного винта посвящена работа Юдина Е.Я. 1944 года [2]. Барри и Маглиоцци в 1971 году [3] предложили модель, которая является развитием модели Гутина Л.Я. в части учёта скорости полёта в расчётном соотношении. Хансон в 1983 году [4] предложил аналитическую модель шума воздушного винта, которая позволяет учитывать некомпактность источника, угол атаки (тангажа) летательного аппарата и подробную геометрию воздушного винта.

Несмотря на существенные успехи в области прогнозирования и снижения шума на местности ЛА с винтовыми двигателями, многие аспекты генерации шума такими аппаратами являются по-прежнему малоизученными.

Одной из важных проблем, вставшей на пути развития пассажирских самолетов с турбовинтовентиляторными двигателями

(ТВВД) в 1980-х годах, стала проблема высоких уровней шума, создаваемого такими самолётами на местности. В то же время высокая топливная эффективность, низкие показатели эмиссии вредных веществ и возможность достижения с такими силовыми установками скоростей полёта, близких к скоростям пассажирских самолетов с турбореактивными двухконтурными двигателями, делают актуальной и своевременной задачу разработки перспективных малошумных ТВВД, обеспечивающих сертификацию и конкурентоспособность на мировом рынке пассажирских самолётов. Шум самолёта с ТВВД на режимах взлёта и набора высоты определяется в основном излучением винтовентилятора.

Еще одной перспективной и актуальной является проблема шума распределённой силовой установки (PCY) для регионального самолёта короткого взлёта и посадки. С одной стороны, такой тип воздушных судов может обеспечить значительную экономию топлива и улучшение взлётно-посадочных характеристик. Для летательных аппаратов с PCY важной задачей является формирование оптимальной компоновки силовой установки, в которой взаимное расположение винтов по отношению к

планеру и их характеристики могут обеспечить требуемые для сертификации таких аппаратов акустические характеристики.

В настоящее время главной задачей аэроакустики винтовых ЛА самолётно-го типа является обеспечение концепции акустического проектирования, т.е. с учётом требуемых акустических параметров, обеспечивающим конкурентные уровни шума гражданских винтовых самолётов и беспилотных воздушных судов (БВС) и низкую степень акустической заметности БВС специального назначения [5].

Для акустического проектирования необходимы надёжные методы оценки шума основных источников (винтовой движитель, двигатель и планер), в том числе на базе численного моделирования, и методы снижения шума как изолированных источников, так и дополнительного излучения, обусловленного интеграцией СУ в компоновке реального ЛА [6]. При экспериментальных исследованиях звуковых полей отдельных источников или установочных эффектов целесообразно применять многомикрофонные решётки и алгоритмы бимформинга [7].

Расчётные и экспериментальные исследования в области аэроакустики выполняются на всех этапах проектирования ЛА с целью обеспечения требуемых акустических характеристик. На начальном этапе проектирования формулируются конкурентные требования к предельно допустимым уровням шума на местности. На этапе сертификационных испытаний выполняется оценка соответствия самолёта заявленным акустическим характеристикам и выполняется финальная валидация расчётного программного обеспечения, используемого для оценки шума ЛА на местности [8].

Целью настоящей работы является формирование современной классификации источников шума и

конкурентных требований по шуму на местности для лёгких винтовых самолётов (ЛВС), обзор современных методов прогнозирования шума винтовых ЛА самолётно-го типа на местности.

## 2 Современная классификация источников шума винтовых летательных аппаратов самолётно-го типа

Доминирующим источником шума винтовых ЛА самолётно-го типа на режиме взлёта является силовая установка [9], в состав которой входят двигатель (поршневой [10], электрический [11, 12], турбовинтовой (ТВД), ТВВД [13]) и винтовой движитель (одиночный воздушный винт, винт в профилированном кольце, биротативный винтовентилятор) в толкающей или тянущей компоновках (рисунок 1). Также в классификации можно отдельно выделить шум агрегатов СУ и шум обтекания элементов планера [14].

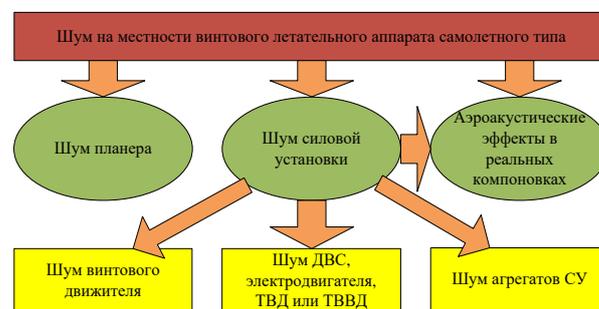


Рисунок 1. Классификация источников шума винтовых ЛА самолётно-го типа

При интеграции силовой установки в компоновке ЛА могут появляться дополнительные установочные эффекты, такие как эффект рассеяния шума силовой установки на элементах планера, на который оказывает влияние рефракция звука в потоке, обтекающем планер, шум взаимодействия «лопасть-турбулентный след» [15] (в случае толкающих воздушных винтов) и шум взаимодействия «лопасть-вихрь» (в случае биротативного винтовентилятора).

Существенные успехи в области снижения шума силовых установок [16, 17] привели к необходимости исследований и учёта аэроакустических эффектов в реальных самолётных компоновках при проектировании

винтовых ЛА. При интеграции силовой установки в компоновке ЛА появляются аэроакустические эффекты (рисунок 2), которые могут приводить как к увеличению шумности ЛА, так и к ее уменьшению.



Рисунок 2. Аэроакустические эффекты при интеграции СУ в компоновке ЛА

При толкающей компоновке винтомоторной СУ, когда воздушный винт работает в турбулентном следе от расположенных выше по потоку элементов планера (крыло, пилон или хвостовое оперение), появляется дополнительный источник шума, называемый в литературе «лопасть-турбулентный след». В этом случае может наблюдаться существенное изменение пространственно-временной структуры звукового поля винтового двигателя относительно изолированной конфигурации.

При размещении винтового двигателя в тянущей компоновке при определённых допущениях при расчётных исследованиях его можно считать изолированным. Однако, при близком расположении элементов планера или других винтовых двигателей, как в случае распределённой СУ, интерференция неизбежно повлияет на аэродинамические и акустические характеристики ЛА.

Компоновка СУ над крылом может обеспечить существенное снижение уровней шума ЛА за счёт рассеяния звука на элементах планера [18].

При установке на ЛА винта в профилированном кольце следует ожидать изменения спектральных и пространственных характеристик шума по сравнению с изолированным воздушным винтом. При установке на ЛА соосных биротативных винтов помимо шума отдельно двух винтов появляется шум, обусловленный взаимодействием «вихревой след–лопасть заднего винта»

### 3 Современные конкурентные требования к предельно допустимым уровням шума на местности

При формировании общих требований к проектируемым и перспективным самолётам необходимо также формулировать требования к предельно допустимым уровням шума на местности на основе известных данных об уровнях

шума эксплуатируемых самолётов, ранее получивших сертификат типа. С этой целью был выполнен анализ базы данных сертификационных испытаний EASA (Европейское агентство авиационной безопасности) по шуму лёгких винтовых самолетов [19, 20].

Показателем степени акустического совершенства самолёта является запас  $\Delta$  в снижении уровня шума самолёта относительно действующих норм:

$$\Delta = L_{AN} - L_{Aизм}, \quad (1)$$

где  $L_{AN}$  и  $L_{Aизм}$  – соответственно предельно допустимое и измеренное значения уровней шума в контрольной точке на местности.

Результаты анализа величин запасов по уровням шума на местности

эксплуатируемых лёгких винтовых самолётов, сертифицированных в соответствии с п. 6.3, 10.4a и 10.b стандарта ИКАО (Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Т. 1. Авиационный шум) [21], представлены в таблице 1. Можно видеть, что некоторые самолёты были сертифицированы в различные годы по разным действующим нормам с практически нулевым запасом (0,1 дБА), максимальный запас достигает величины 20 дБА, а средняя величина запаса по всем самолётам, рассмотренным в базе данных EASA, составляет для современных ЛВС, сертифицированных согласно требованиям п 10.4a, 7,5 дБА, а согласно п. 10.4b, 6 дБА.

Таблица 1. Минимальные, максимальные и средние запасы по уровням шума легких винтовых самолетов, сертифицированных в соответствии с главами 6 и 10 стандарта ИКАО

Требования пунктов стандарта ИКАО	п 6.3	п 10.4a	п 10.4b
Минимальный запас, дБА	0,1	0,1	0,1
Максимальный запас, дБА	18,6	20	17,4
Среднее значение, дБА	4,6	7,5	6

В качестве предельно допустимого уровня шума на местности проектируемого двухдвигательного ЛВС (конкурентного уровня шума) следует задавать величину на 7,5 дБА ниже значения пункта 10.4a стандарта ИКАО. Величины конкурентных уровней шума для современных проектируемых двухдвигательных ЛВС в зависимости от максимальной взлётной массы ( $MTOW$ ) представлены в таблице 2.

При этом в качестве предельно допустимого уровня шума на местности проектируемого однодвигательного ЛВС (конкурентного уровня шума) следует задавать величину на 6 дБА ниже значения пункта 10.4b стандарта ИКАО. Величины конкурентных уровней шума для современных проектируемых двухдвигательных самолётов в зависимости от максимальной взлётной массы представлены в таблице 3.

Таблица 2. Требования главы 10 п. 10.4a стандарта ИКАО (в зависимости от взлётной массы) и конкурентно необходимые уровни шума, на которые необходимо ориентироваться при проектировании двухдвигательных современных ЛВС

$MTOW$ – максимальная взлетная масса в 1000 кг	0÷0,6	0,6÷1,4	1,4÷8,618
Уровень шума в соответствии с п. 10.4a, дБА	76	83,23+32,67lg $MTOW$	88
Конкурентный уровень шума для двухдвигательных ЛВС, дБА	68,5	75,73+32,67lg $MTOW$	80,5

Таблица 3. Требования главы 10 п. 10.4b стандарта ИКАО (в зависимости от взлётной массы) и конкурентно необходимые уровни шума, на которые необходимо ориентироваться при проектировании однодвигательных современных ЛВС

<i>MTOW</i> – максимальная взлётная масса в 1000 кг	0÷0,57	0,57÷1,5	1,5÷8,618
Уровень шума в соответствии с п. 10.4b, дБА	70	78,71+35,7lg <i>MTOW</i>	85
Конкурентный уровень шума для однодвигательных ЛВС, дБА	64	72,71+35,7lg <i>MTOW</i>	79

Одной из актуальных задач аэроакустики винтовых БВС самолётного типа является разработка норм, ограничивающих предельно допустимые уровни шума на местности таких аппаратов. Нормы по шуму БВС на местности целесообразно разрабатывать по аналогии с нормами ИКАО для ЛВС. Разработка подобного рода нормативных документов требует выполнения множества экспериментальных исследований шума эксплуатируемых БВС и оценки степени их акустического совершенства.

С учётом рассмотренных выше подходов к нормированию шума на местности лёгких винтовых самолётов

(таблицы 2 и 3) аналогичным образом может быть предложен подход к нормированию уровней шума на местности винтовых БВС самолётного типа. Предлагаемая концепция нормирования шума на местности винтовых БВС самолётного типа с взлётной массой до 600 кг представлена в таблице 4. Константы от А до G зависят от взлётной массы и определяют максимальный суммарный уровень шума БВС в дБА. В первом приближении до получения базы данных акустических характеристик БВС можно принять константы C=18,5, E=35,7 и G=35,7.

Таблица 4 – Предлагаемая концепция нормирования шума на местности винтовых БВС самолетного типа с максимальной взлетной массой до 600 кг

<i>MTOW</i> – максимальная взлетная масса, кг	0÷2	2÷20	20÷150	150÷600
Суммарный по спектру уровень шума, дБА	A	B+Clg <i>MTOW</i>	D+Elg <i>MTOW</i>	F+Glg <i>MTOW</i>

Нормируемым по шуму на местности в данном случае является режим прямолинейного крейсерского полёта с максимальной скоростью на заданной высоте. Испытания выполняются при максимальной взлётной массе аппаратов. Единицей оценки шума на местности является скорректированный по шкале А стандартного шумомера максимальный суммарный уровень шума.

#### 4 Современные методы расчёта шума на местности

Структура расчётного метода оценки шума винтового ЛА представлена на

рисунке 3 как суперпозиции звуковых полей основных источников с учётом аэроакустических эффектов в реальных компоновках ЛА.

Оценка уровней отдельных спектральных составляющих и суммарных уровней шума винтового ЛА самолетного типа осуществляется как энергетическая сумма уровней шума винта (Лвинта), двигателя (Лдвигателя) и планера (Лпланера) с учетом корректирующей функции ( $\Delta L$ ), учитывающей аэроакустические эффекты при интеграции винтомоторной СУ в компоновке ЛА:

$$L_{ЛА} = 10 \lg \left( 10^{0,1L_{\text{винта}}} + 10^{0,1L_{\text{двигателя}}} + 10^{0,1L_{\text{планера}}} \right) + \Delta L \quad (2)$$

где  $L_{\text{ЛА}}$  – суммарный уровень шума ЛА по спектру или в заданной полосе частот в метриках дБ или дБА.

При этом для расчёта шума изолированных источников – винтовой движитель, двигатель и планер – могут быть использованы различные методы.

В настоящее время широкое внимание уделяется численному моделированию шума различных типов винтовых движителей. Однако, существующее коммерческое программное обеспечение (ПО) неэффективно при решении такого рода задач [22], и заинтересованные организации: МАИ (НИУ), ФАУ «ЦАГИ», ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и другие самостоятельно разрабатывают собственное ПО для корректной постановки численных аэроакустических экспериментов [23–25]. Плюсом численного моделирования является возможность учёта всех параметров, влияющих на уровни шума винтового движителя, включая установочные эффекты.

Среди широко используемых полуэмпирических методов расчёта шума воздушного винта стоит выделить метод, предложенный Самохиным В.Ф. [26]. Полуэмпирический метод получил развитие [27], в первую очередь, за счёт получения на базе выполненных исследований эмпирических коэффициентов пропорциональности и факторов направленности. Также в рамках модификации полуэмпирического метода предложено рассчитывать звуковую мощность первой гармоники шума вращения винта как суммы составляющих шума от аэродинамической нагрузки и вытеснения, а остальные гармоники в спектре оценивать с учётом уменьшения интенсивности шума гармоник с частотой согласно предложенной асимптотической зависимости.

Для оценки шума поршневого двигателя может быть использована эмпирическая модель [28], а для расчёта шума обтекания крыла и вихревого шума

воздушного винта может быть использована модель так называемого шума задней кромки, предположительно являющегося доминирующим источником широкополосного шума воздушного винта и шума обтекания крыла без выпущенной механизации [27].

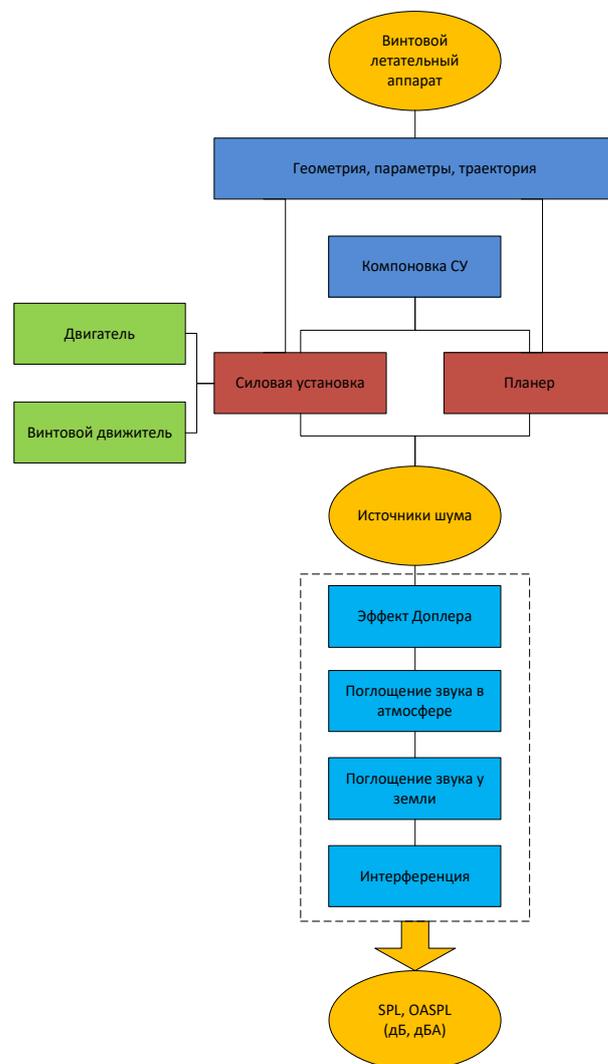


Рисунок 3. Структура расчётного метода оценки шума винтового ЛА на местности

В качестве примера оценки шума на местности на рисунке 4 представлено сравнение рассчитанного по предложенному методу и измеренного третьоктавных спектров уровней звукового давления (SPL) для направления максимума пролётного шума в дБА при пролёте самолета АН-2 с крейсерской скоростью 180 км/ч на высоте 100 м.

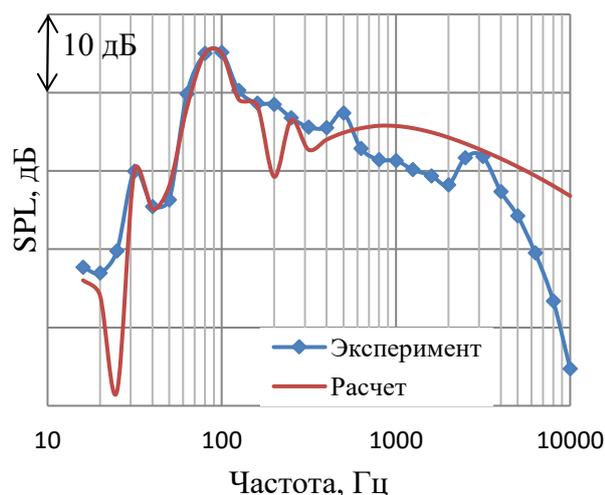


Рисунок 4 – Сравнение 1/3-октавных спектров уровней звукового давления, рассчитанных по предложенному методу и измеренных при пролете самолета АН-2 с крейсерской скоростью 180 км/ч на высоте 100 м (частота вращения коленвала 1800 об/мин)

Можно видеть хорошее согласование результатов расчёта с экспериментальными данными. Суммарный взвешенный по шкале стандартного шумомера уровень звукового давления в расчёте завышен на 2,7 дБА по сравнению с экспериментом. Данные результаты свидетельствуют о возможности эффективного применения метода оценки шума винтовых ЛА самолётного типа на различных этапах проектирования.

## 5 Заключение

Первая успешная модель генерации шума воздушным винтом была опубликована советским ученым Гутиным Л.Я. в 1936 году. Тем не менее, данное направление исследований остается актуальным и в настоящее время ввиду широкого применения винтовых БВС, проектирования самолётов короткого взлёта и посадки с распределённой силовой установкой, исследования возможности применения ТВВД на ближне- и среднемагистральных пассажирских самолётах, а также

электрических и гибридных силовых установок в малой и беспилотной авиации.

В рамках настоящей работы рассмотрена современная классификация источников шума винтовых ЛА самолётного типа с учётом аэроакустических эффектов, возникающих при интеграции СУ в компоновке ЛА. Сформулированы конкурентно необходимые уровни шума, на которые стоит ориентироваться при проектировании одно- и двухдвигательных ЛВС, а также предложен подход к нормированию шума винтовых БВС самолётного типа. Кратко рассмотрены современные методы прогнозирования шума винтовых ЛА самолётного типа на местности.

## Список использованных источников

- [1] Гутин Л.Я. О звуковом поле вращающегося винта // Журнал технической физики. 1936. Т.6. № 5. С. 899–909.
- [2] Юдин Е.Я. О вихревом шуме вращающихся стержней // Журнал технической физики. 1944. Т.12. № 9. С.561–567.
- [3] Barry F.W., Magliozzi B. Noise detectability prediction method for low tip speed propellers. Wright-Patterson AFB, Ohio, AFAPL-TR-71-37, 1971.
- [4] Hanson D.B. Compressible helicoidal surface theory for propeller aerodynamics and noise // AIAA Journal. 1983. Vol. 21. No. 6. pp. 881–889.
- [5] Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А. Выбор критерия слышимости беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 2. С 3–9.
- [6] Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft, Akustika. 2019. Vol. 34. pp. 68–73.
- [7] Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Величко С.А., Долотовский А.В., Шевяков В.И. Об определении аэродинамического шума основных элементов натурального самолета с использованием многомикрофонной антенны и алгоритмов бимформинга // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 506. № 1. С. 68–81.
- [8] Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф. Комплекс алгоритмов и программ для расчета шума самолетов на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 2. С. 136–157.
- [9] Мошков П.А. Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности //

Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 101–106.

[10] Мошков П.А. Акустические характеристики авиационных поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 4. С. 11–16.

[11] Ismagilov F.R., Varyukhin A.N., Vavilov V.E., Bekuzin V.I., Gusakov D.V. System Approach to Electric Machines Development for Aviation Hybrid Propulsion Systems under Economic Crisis // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2021. Vol. 57. No. 6. pp. 3768–3781.

[12] Adu-Gyamfi B.A., Good C. Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies // Transportation Engineering. 2022. Vol. 9. No. 100134. DOI: 10.1016/j.treng.2022.100134

[13] Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А. Проблемы снижения шума, создаваемого на местности самолетами с турбовинтовентиляторными двигателями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 126–128.

[14] Мошков П.А. Исследование шума обтекания крыла беспилотного воздушного судна // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 63–69.

[15] Мошков П.А., Самохин В.Ф. Исследование влияния зазора между толкающим воздушным винтом и крылом на уровень шума легкого самолета на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. 47. № 6. С. 55–60.

[16] Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф., Халецкий Ю.Д. Влияние технического прогресса на уровни шума силовых установок реактивных самолетов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2019. № 4. С. 3–18.

[17] Копьев В.Ф. Традиции и перспективы акустических исследований в ЦАГИ // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 11. С. 60–69.

[18] Денисов С.Л., Остриков Н.Н., Гранич В.Ю. Проблемы снижения шума авиационных силовых установок с помощью эффекта экранирования // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 3. С. 298–302.

[19] Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустика легких винтовых самолетов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 3. С. 3–12.

[20] Мошков П.А., Самохин В.Ф. Проблемы проектирования легких винтовых самолетов с учетом требований по шуму на местности // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 19–34.

[21] Международные стандарты и Рекомендуемая практика. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Т. 1. Авиационный шум. Изд. 7, 2014.

[22] Herniczek M.K., Feszty D., Meslioui S., Park J. Applicability of Early Acoustic Theory for Modern Propeller Design // 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. No. AIAA 2017-3865. DOI: 10.2514/6.2017-3865

[23] Timushev S., Yakovlev A., Moshkov P. Numerical simulation of the light aircraft propeller noise under static condition // Akustika. 2021. Vol. 41. pp. 100–106.

[24] Bobkov V.G., Kozubskaya T.K., Kudryavtseva L.N., Tsvetkova V.O. Hybrid dynamic mesh redistribution – immersed boundary method for acoustic simulation of flow around a propeller // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2022. Vol. 9. No. 4. pp. 69–84. DOI: 10.14529/jsfi220407

[25] Копьев В.Ф., Титарев В.А., Беляев И.В. Разработка методологии расчета шума винтов с использованием суперкомпьютеров // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. №2. С. 78–106.

[26] Самохин В.Ф. Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 5. С. 1064–1072.

[27] Мошков П.А., Самохин В.Ф. Интегральная модель шума винтомоторной силовой установки // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 2. С. 353–360.

[28] Мошков П.А. Эмпирический метод прогноза шума авиационных поршневых двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 152–161. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-152-161

**MODERN PROBLEMS OF AEROACOUSTICS OF  
PROPELLER-DRIVEN FIXED-WING AIRCRAFTS**

**M.A. Pogosyan,  
P.A. Moshkov**

Moscow Aviation Institute  
(National Research University)

Volokolamskoye shosse, 4, Moscow,  
125993, Russian Federation

moshkov89@bk.ru

*The modern classification of noise sources of propeller-driven fixed-wing aircraft is considered. Competitive community noise levels for single- and twin-engine for the projected light propeller-driven aircraft are formulated. An approach to community noise regulation of propeller-driven fixed-wing unmanned aerial vehicles is proposed. Modern approaches to assessing the community noise of propeller-driven fixed-wing aircraft are considered.*

**Keywords:** *aeroacoustics; community noise; light propeller-driven aircrafts; unmanned aerial vehicles; propeller noise*

## References

- [1] Gutin L.Ya. About the sound field of a rotating propeller. Journal of Technical Physics. 1936. vol.6. no. 5. pp. 899–909. (in Russian)
- [2] Yudin E.Ya. On vortex noise of rotating rods. Journal of Technical Physics. 1944. vol.12. no. 9. pp.561–567. (in Russian)
- [3] Barry F.W., Magliozzi B. Noise detectability prediction method for low tip speed propellers. Wright-Patterson AFB, Ohio, AFAPL-TR-71-37, 1971.
- [4] Hanson D.B. Compressible helicoidal surface theory for propeller aerodynamics and noise. AIAA Journal. 1983. Vol. 21. No. 6. pp. 881–889.
- [5] Moshkov P.A., Samokhin V.F., Yakovlev A.A. Selection of an audibility criterion for propeller driven unmanned aerial vehicle. Russian Aeronautics. 2018. vol. 61. no 2. pp. 149-155.
- [6] Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft, Akustika. 2019. Vol. 34. pp. 68–73.
- [7] Kopyev V.F., Zaitsev M.Yu., Velichko S.A., Dolotovskiy A.V., Shevyakov V.I. On determining the aerodynamic noise of the main elements of a full-scale aircraft using a multimicrophone antenna and beamforming algorithms. Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, technical sciences. 2022. Vol. 506. No. 1. pp. 68-81. (in Russian)
- [8] Dmitriev V.G. Samokhin V.F. Complex of algorithms and programs for calculating aircraft community noise. TsAGI Science Journal. 2014. vol. 45. vol. 2. pp. 136–157. (in Russian)
- [9] Moshkov P.A. Classification of community noise source by light propeller aircrafts. Scientific and technical Volga region bulletin. 2015. no 4. pp. 101-106. (in Russian)
- [10] Moshkov P.A. Acoustic characteristics of aircraft piston engines. Russian Aeronautics. 2020. vol. 63. no. 4. pp. 568-574.
- [11] Ismagilov F.R., Varyukhin A.N., Vavilov V.E., Bekuzin V.I., Gusakov D.V. System Approach to Electric Machines Development for Aviation Hybrid Propulsion Systems under Economic Crisis. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2021. vol. 57. no. 6. pp. 3768–3781.
- [12] Adu-Gyamfi B.A., Good C. Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. Transportation Engineering. 2022. vol. 9. no. 100134. DOI: 10.1016/j.treng.2022.100134
- [13] Moshkov P.A., Samokhin V.F., Yakovlev A.A. Problem of the community noise reduction for aircraft with open rotor engines. Russian Aeronautics. 2018. vol. 61. no 4. pp. 647-650.
- [14] Moshkov P.A. Study of the wing noise of an unmanned aerial vehicle. Russian Aeronautics. 2021. vol. 64. no. 2. pp. 240-247.
- [15] Moshkov P.A., Samokhin V.F. Investigation of the effect of the gap between the pusher propeller and the wing on the community noise level of a light aircraft. TsAGI Science Journal. 2016. vol. 47. no. 6. pp. 55-60.
- [16] Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Khaletskii Yu.D. Effect of technical progress on the airplane noise. Polet. 2019. no. 4. pp. 3-18. (in Russian)
- [17] Kopiev V.F. The main milestones in the development of acoustic department of TsAGI are considered. Polet. 2018. no. 11. pp. 60-69. (in Russian)
- [18] 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.

- [19] Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Moshkov P.A. Acoustics of light propeller-driven aircraft. Polet. 2022. no 3. pp. 3-12. (in Russian)
- [20] Moshkov P.A., Samokhin V.F. Problems of light propeller-driven airplane design with regard to community noise requirements. Aerospace MAI Journal. 2021. vol. 28. no 1. pp. 19–34. (in Russian)
- [21] Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Montreal. Canada. ICAO. 2011. Vol. 1 Aircraft Noise. 227 p.
- [22] Herniczek M.K., Feszty D., Meslioui S., Park J. Applicability of Early Acoustic Theory for Modern Propeller Design. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. No. AIAA 2017-3865. DOI: 10.2514/6.2017-3865
- [23] Timushev S., Yakovlev A., Moshkov P. Numerical simulation of the light aircraft propeller noise under static condition. Akustika. 2021. vol. 41. pp. 100-106.
- [24] Bobkov V.G., Kozubskaya T.K., Kudryavtseva L.N., Tsvetkova V.O. Hybrid dynamic mesh redistribution – immersed boundary method for acoustic simulation of flow around a propeller. Supercomputing Frontiers and Innovations. 2022. Vol. 9. No. 4. pp. 69–84. DOI: 10.14529/jsfi220407
- [25] Kopiev V.F., Titarev V.A., Belyaev I.V. Development of a methodology for propeller noise calculation on high-performance computer. TsAGI Science Journal. 2014. V. 45. No. 3-4. pp. 293-327. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2014011857
- [26] Samokhin V.F. Semiempirical method for estimating the noise of a propeller. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2012. vol. 85. no 5. pp. 1157-1166.
- [27] Moshkov P.A., Samokhin V.F. Integral model of noise of an engine-propeller power plant. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. vol. 91. no 2. pp. 332-338.
- [28] Moshkov P.A. Empirical method of predicting aviation piston engine noise. Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2016. vol. 15. no. 2. pp. 152-161. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-152-161 (in Russian)