

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕГКИХ ВИНТОВЫХ САМОЛЕТОВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПО ШУМУ НА МЕСТНОСТИ

Мошков П.А.^{1*}, Самохин В.Ф.^{2**}

¹ «Региональные самолеты» — филиал Корпорации «Иркут»,
ул. Ленинская Слобода, 26, с. 5, Москва, 115280, Россия

² Центральный аэрогидродинамический институт
им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия

* e-mail: moshkov89@bk.ru, p_moshkov@ssj.irkut.com

** e-mail: samohin_vf@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.09.2020

Рассмотрена проблема шума на местности легких винтовых самолетов. Представлен перечень основных работ в области аэроакустики, выполняемых при проектировании самолета разработчиком и поставщиками силовой установки. Выполнен анализ базы данных сертификационных акустических испытаний EASA. Рассмотрено влияние числа лопастей воздушного винта и глушителей шума выхлопа поршневых двигателей на уровни шума легких винтовых самолетов на местности.

Ключевые слова: легкий винтовой самолет, шум на местности, аэроакустическое проектирование, технологии снижения шума.

Введение

В последнее время наблюдается тенденция к ужесточению международных нормативных требований по шуму гражданских воздушных судов на местности [1, 2]. Современные проектируемые летательные аппараты (ЛА) должны быть существенно менее шумными, чем самолеты, эксплуатируемые в настоящее время [3–8]. Проектирование современных летательных аппаратов ведется с учетом действующих и перспективных международных норм по шуму на местности. Актуальность проблемы обеспечения акустического проектирования в рамках жизненного цикла гражданских самолетов не вызывает сомнения, однако в литературе нет информации о том, какие работы на различных этапах создания нового легкого винтового самолета (ЛВС) необходимо выполнять с целью обеспечения его успешной сертификации по шуму на местности и конкурентоспособности на мировом рынке.

Настоящая работа посвящена формированию концепции акустического проектирования легкомоторных самолетов в рамках жизненного цикла

изделия, а также анализу базы данных сертификационных испытаний EASA (Европейское агентство по безопасности полетов) [9] с целью определения требований к проектируемым самолетам и влияния различных факторов на сертификационные уровни шума.

Нормирование шума легкомоторных самолетов на местности

Уровни шума, создаваемого на местности винтовыми самолетами массой не более 8618 кг, регламентируются Главами 6 и 10 стандарта ИКАО [1]. Нормы не распространяются на самолеты, специально сконструированные и используемые для высшего пилотажа, сельскохозяйственных целей или борьбы с пожарами, и на мотопланы.

Единицей оценки шума винтовых самолетов на местности является скорректированный по шкале А стандартного шумомера максимальный суммарный уровень шума в диапазоне частот 45–11200 Гц.

Самолеты, заявка на сертификат типа которых была подана до 17 ноября 1988 года, сертифицировались согласно требованиям Главы 6 стандарта ИКАО (табл. 1). Акустические испытания включают в себя серию горизонтальных полетов, выполняемых с максимальной крейсерской скоростью на высоте 300 м. Микрофон свободного поля диаметром 12,7 мм, чувствительный к изменению давления, устанавливается таким образом, чтобы центр чувствительного элемента находился на высоте 1,2 м от поверхности земли. Когда скорость ветра превышает 3 м/с, используется микрофон с ветрозащитным экраном.

Таблица 1

Требования Главы 6 стандарта ИКАО по шуму винтовых самолетов на местности

Требования пункта 6.3			
Максимальная нормальная взлетная масса M, 1000 кг	0—0,6	0,6—1,5	1,5—8,618
Уровень шума, дБА	68	60+13,3lgM	80

Для современных самолетов, в отношении которых заявка на сертификат типа подана 17 ноября 1988 года и позже, применяются максимальные уровни шума, указанные в п. 10.4а Главы 10 стандарта ИКАО (табл. 2). На самолеты модифицированных вариантов, в отношении которых заявка на сертификат типа была подана 4 ноября

Таблица 2

Требования Главы 10 стандарта ИКАО по шуму винтовых самолетов на местности

Требования пункта 10.4а			
Максимальная нормальная взлетная масса M, 1000 кг	0—0,6	0,6—1,4	1,4—8,618
Уровень шума, дБА	76	83,23+32,67lgM	88
Требования пункта 10.4б			
Максимальная нормальная взлетная масса M, 1000 кг	0—0,57	0,57—1,5	1,5—8,618
Уровень шума, дБА	70	78,71+35,7lgM	85

1999 года и позже, распространяются требования п. 10.4б.

Контрольной точкой измерения шума в данном случае является точка на продолжении осевой линии взлетно-посадочной полосы, расположенная на расстоянии 2500 м от начала разбега самолета при выполнении взлета.

При этом на земле устанавливается в развернутом положении микрофон (свободного поля диаметром 12,7 мм) с защитной сеткой так, чтобы диафрагма микрофона находилась на 7 мм выше и параллельно круглой металлической плите. Микрофон устанавливается на расстоянии, равном 3/4 от центра до края плиты, по радиусу перпендикулярно линии полета испытываемого самолета. Пример установки микрофона показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид измерительного микрофона при выполнении сертификационных испытаний согласно требованиям Главы 10 стандарта ИКАО

В летном эксперименте определить влияние взлетной массы самолета на уровни шума на местности в явном виде достаточно сложно. Для диапазонов взлетных масс 600—1500 кг (п. 6), 600—1400 кг (п. 10.4а) и 570—1500 кг (п. 10.4б) взвешенный уровень шума задан как функция взлетной массы. Полагая, что для крейсерского режима полета винтовых летательных аппаратов интенсивность шума пропорциональна взлетной массе в степени 1,33 (см. табл. 1), а для взлетного режима — среднему значению между данными для п. 10.4а и п. 10.4б (см. табл. 2), т.е. в степени 3,42, можно ввести корректирующую функцию для учета влияния взлетной массы на уровни шума ЛА на местности, дБА:

$$\Delta L_1 = K_1 10 \lg \left(\frac{M_1}{M_0} \right), \tag{1}$$

где K_1 – показатель степени зависимости интенсивности шума от взлетной массы; нижние индексы 0 и 1 обозначают нормальную и фактическую взлетные массы ЛА соответственно.

Помимо обеспечения сертификации ЛВС по шуму на местности, стоит задача обеспечения низких уровней шума в зонах жилой застройки, прилегающих к аэродромам базирования малой авиации. Уровни шума на территории жилой застройки нормируются согласно требованиям ГОСТ 22283-2014 [10] и санитарных норм СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [11] (табл. 3). Различие в нормативных документах наблюдается только в максимальных уровнях шума при единичном воздействии. В любом случае средние уровни шума (55 дБА в дневное время и 45 дБА в ночное время) очень низкие. Такие уровни шума могут соответствовать уровням фона окружающей среды без присутствия источников шума техногенного происхождения [12].

вых установок может стать существенным наряду с шумом воздушного винта.

При интегрировании силовой установки в компоновку самолета могут появляться дополнительные эффекты, такие как эффект рассеяния шума силовой установки на элементах планера, шум взаимодействия «лопасть-турбулентный след». Существенные успехи в области снижения шума силовых установок привели к необходимости исследований и учета аэроакустических эффектов в реальных самолетных компоновках при проектировании винтовых самолетов.

Роль и место аэроакустических исследований при проектировании легких винтовых самолетов

Согласно требованиям ГОСТ Р 58849-2020 [20] создаваемая авиационная техника должна удовлетворять требованиям заказчика, требованиям к летной годности и охране окружающей среды от воздействия авиации и обеспечивать возможность

Таблица 3

Предельно допустимые уровни шума на территории жилой застройки

Нормативный документ	Суммарные эквивалентные уровни шума, дБА		Максимальные уровни шума при единичном воздействии, дБА	
	с 7.00 до 23.00 ч.	с 23.00 до 7.00 ч.	с 7.00 до 23.00 ч.	с 23.00 до 7.00 ч.
ГОСТ 22283-2014	55	45	75	65
СН 2.2.4/2.1.8.562-96	55	45	70	60

Одним из подходов к снижению уровней шума в зоне жилой застройки является оптимизация пилотирования самолета за счет построения оптимальной траектории полета при минимальной располагаемой мощности силовой установки с целью минимизации шумового следа [13–16].

Источники шума легких винтовых самолетов на местности

Как правило, доминирующим источником шума ЛВС на режиме взлета и крейсерского полета является силовая установка (СУ) [17–19], в состав которой входят двигатель (поршневой или турбовинтовой) и воздушный винт в толкающей или тянущей компоновках. К дополнительным источникам шума на местности относится шум обтекания планера, который при широком распространении электрических и гибридных сило-

ее эффективного и безопасного применения. Обеспечение требуемого уровня акустического совершенства авиационной техники является одной из приоритетных задач конструкторского бюро (КБ).

При проектировании легкого винтового самолета с учетом требований по шуму на местности задача КБ состоит в оптимальном выборе силовой установки и ее интеграции в компоновку самолета. При этом необходимо выполнять целый ряд расчетных и экспериментальных исследований, сопровождающих разработку нового самолета в рамках жизненного цикла. Принципиальная схема с перечнем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), выполняемых производителем самолета на различных этапах проектирования, представлена на рис. 2.

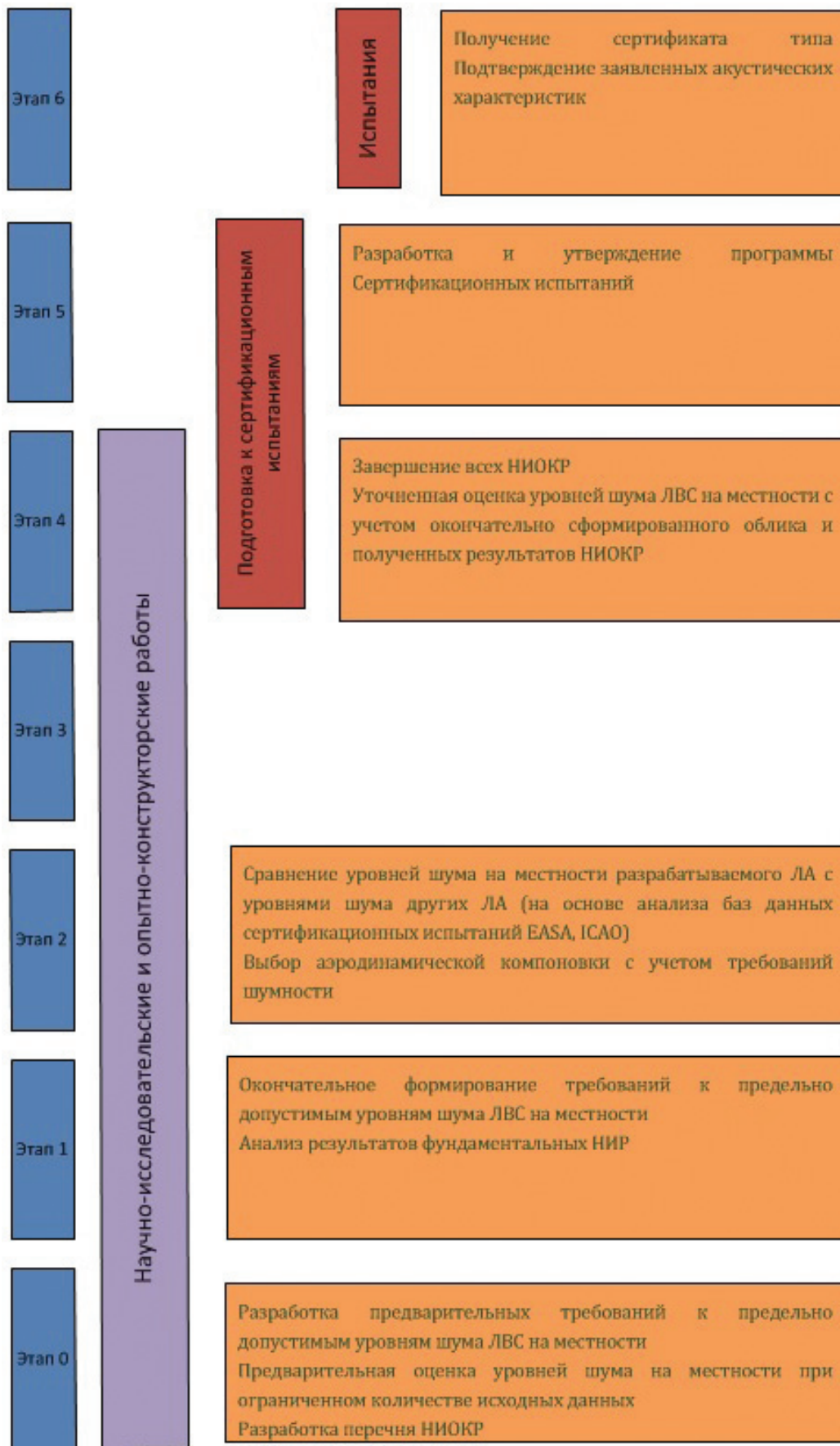


Рис. 2. Схема выполнения НИОКР в области аэроакустики в рамках жизненного цикла легкого винтового самолета

Поставщики элементов СУ — двигателя и воздушного винта — самостоятельно выполняют НИОКР в необходимом объеме для осуществления требований разработчика самолета. Среди этих возможных НИОКР выделим следующие:

— разработка глушителя шума выхлопа двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с учетом допустимых габаритных размеров при установке на самолете и требуемого уровня шумоподавления на взлетном режиме работы СУ. Для этого выполняются расчетные исследования с последующим изготовлением образцов и проведением их испытаний на открытом стенде или в специальном заглушенном помещении;

— расчетные и экспериментальные исследования с целью проектирования профиля винта по критерию минимальной мощности акустического излучения с минимально возможной толщиной профиля и требуемыми аэродинамическими характеристиками (взлетная тяга и КПД на крейсерском режиме полета);

— стендовые акустические испытания винтов, двигателей и силовой установки в целом и т.д.

Поставщики двигателя и воздушного винта передают в КБ данные об уровнях шума в дальнем звуковом поле в виде третьоктавных спектров уровней звукового давления в диапазоне среднегеометрических частот 50—10000 Гц, измеренных для различных углов наблюдения.

Рассмотрим подробно работы в области аэроакустики, выполняемые КБ при проектировании легкого винтового самолета.

Этап 0 — выполняется предварительный анализ возможности создания самолета; формируется его концепция; разрабатываются предварительные требования к предельно допустимым уровням шума самолета и выполняется предварительная оценка уровней шума при ограниченном количестве исходных данных; обосновывается и формируется перечень НИОКР в рамках аэроакустики для реализации концепции нового самолета. Среди таких НИОКР отметим:

— численные и экспериментальные исследования аэроакустических эффектов при интеграции силовой установки в компоновку самолета;

— совершенствование алгоритмов и программ для оценки шума самолетов на местности [21] и др.

Результатом выполнения поисковых и прикладных НИОКР является перечень технологий с уровнем готовности технологий 6 [22], обеспечивающих с вероятностью 80 % требуемого уровня акустического совершенства самолета.

Этап 1 («Разработка технического предложения») — окончательно формируются требования к предельно допустимым уровням шума на местности самолета, а также проводится анализ результатов фундаментальных НИОКР, выполняемых отраслевыми институтами (ЦАГИ, ЦИАМ, ИПМ им. Келдыша) в области аэроакустики, необходимых для реализации проекта.

Этап 2 («Разработка эскизного проекта») — выполняется развитие и детализация концепции самолета, в том числе анализ технического уровня совершенства самолета и сравнение уровней шума на местности разрабатываемого самолета с уровнями шума других эксплуатируемых (на основе анализа баз данных сертификационных испытаний EASA, ICAO, авиарегистр МАК) и перспективных самолетов (на базе доступных публикаций). Осуществляется выбор предпочтительного варианта конфигурации самолета и подтверждается возможность достижения целевых показателей.

Этап 3 («Разработка технического проекта») — работы в области аэроакустики в рамках предлагаемой концепции не предусмотрены, однако процесс совершенствования расчетных алгоритмов и программ для оценки шума самолетов на местности в КБ является непрерывным.

Этап 4 («Разработка рабочей конструкторской документации») — окончательно формируется облик самолета, разрабатываются технические и технологические решения, обеспечивающие выполнение предъявляемых к самолету эксплуатационно-технических требований. Завершаются все НИОКР в обеспечение создания основных агрегатов, выполняется оценка уровней шума на местности проектируемого ЛА с учетом окончательного облика самолета и получения результатов выполненных НИОКР. Работы по этапу заканчиваются подачей заявки в сертифицирующие органы.

Этап 5 («Изготовление опытного самолета») — разрабатывается и утверждается программа сертификационных акустических испытаний согласно требованиям нормативных документов ИКАО.

Этап 6 («Летные испытания и сертификация самолета») — проводятся испытания самолета, выполняется подтверждение самолета требованиям нормативных документов. Результаты сертификационных испытаний используются для оценки соответствия самолета заявленным акустическим характеристикам; выполняется валидация расчетных методов. На базе выполненных в рамках проекта НИОКР разрабатывается документ «Прин-

ципы акустического проектирования легких винтовых самолетов» для обеспечения создания научно-технического задела.

Проектирование современных самолетов, двигателей и воздушных винтов осуществляется с использованием современных CALS-технологий, позволяющих сократить время создания самолета за счет автоматизации процесса проектирования [23–27]. В частности, активно развиваются методы численного моделирования шума воздушных винтов [28] и установочных эффектов [29, 30].

Анализ базы данных сертификационных испытаний EASA

В базе данных сертификационных испытаний EASA [9] представлена информация обо всех сертифицированных в Европе типах воздушных судов, включая следующую информацию:

- держатель сертификата типа;
- обозначение типа самолета;
- взлетная масса;
- номер главы и пункта, в соответствии с которым выполнялась сертификация;
- максимальные взвешенные по шкале А стандартного шумомера уровни звукового давления;
- запас относительно требований стандарта;
- производитель и тип двигателя, наличие глушителей и их модификаций;
- производитель и тип воздушных винтов.

Запасы относительно требований норм

При формировании требований к разрабатываемым и перспективным самолетам необходимо сформулировать требования к предельно допустимым уровням шума на местности на основе известных данных об уровнях шума эксплуатируемых самолетов. Результаты анализа величин запасов по уровням шума на местности эксплуатируемых ЛВС, сертифицированных в соответствии с п. 6.3, 10.4а и 10.б стандарта ИКАО, представлены в табл. 4. Можно видеть, что некоторые самолеты были сертифицированы с практически нулевым запасом, максимальный запас достигает величины 20 дБА, а средняя величина запаса по всем самолетам, рассмотренным в базе данных EASA, для современных самолетов, сертифицируемых согласно требованиям п. 10.4б, составляет 6 дБА. Поэтому в качестве предельно допустимого уровня шума на местности проектируемого самолета следует задавать величину как минимум на 6 дБА ниже значения п. 10.4б стандарта ИКАО (см. табл. 2).

Таблица 4

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. 10.4а	п. 10.4б
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

Влияние числа лопастей и диаметра воздушного винта

Возможности снижения шума воздушного винта за счет изменения геометрии лопасти до настоящего времени авторы ограничивали величиной 3 дБ [31]. Согласно [32], аэроакустическая оптимизация профиля лопасти 6-лопастного воздушного винта в рамках численного эксперимента привела к снижению суммарного уровня шума на 5 дБ. При этом за счет изменения стреловидности лопасти можно достичь снижения уровня шума винта на 2 дБА [33], а за счет изменения формы законцовки лопасти можно снизить уровень шума на 1–2 дБ.

Аэроакустическая оптимизация профиля лопасти — процесс трудоемкий и не гарантирующий, в конечном счете, существенного снижения уровней шума в компоновке самолета. Наиболее эффективным способом снижения шума воздушного винта является его оптимизация с точки зрения изменения числа лопастей и диаметра.

На основе анализа полуэмпирической модели шума воздушного винта [34, 35] авторами были предложены простые соотношения, которые позволяют оценить влияние диаметра и числа лопастей на тональные составляющие шума воздушного винта при условии постоянства тяги рассматриваемых винтов, а также при сохранении аэродинамического подобия и неизменности числа Маха окружной скорости в концевом сечении [36, 37].

Расчетное изменение уровня звуковой мощности шума от аэродинамической нагрузки записывается в виде:

$$\Delta L_w = 20 \lg \frac{d_1}{d_2} + 50 \lg \frac{z_1}{z_2}, \quad (2)$$

где d — диаметр винта; z — число лопастей.

На практике число лопастей воздушного винта, как правило, увеличивается не более чем на

одну. Согласно выражению (2) при условии неизменности диаметра получены значения снижения уровней звуковой мощности при увеличении числа лопастей (табл. 5). Наибольшего снижения шума следует ожидать при увеличении числа лопастей с двух до трех. Для многолопастных винтов дальнейшее увеличение числа лопастей приводит к существенно меньшему снижению шума.

Таблица 5

Расчетные значения снижения звуковой мощности составляющей шума винта от аэродинамической нагрузки при увеличении числа лопастей

Базовое число лопастей	2	3	4	5
Модификация винта	3	4	5	6
$\Delta L_{ш}$, дБ	8,8	6,3	4,9	4

Информация о самолетах для оценки влияния числа лопастей и диаметра винта на уровни шума в контрольных сертификационных точках представлена в табл. 6. Данные о диаметре и числе лопастей воздушных винтов взяты из руководств по эксплуатации производителей [38–42]. Для модифицированных силовых установок в крайнем правом столбце указана величина снижения шума $\Delta OASPL$ по сравнению с базовой конфигурацией.

При увеличении числа лопастей с двух до трех, с трех до четырех и с четырех до пяти уровни шума самолетов снижаются в среднем на 3,4 дБА (табл. 6). Теоретическое снижение уровней шума (см. табл. 5) существенно выше фактического, поскольку все сравниваемые самолеты оснащены двигателями без глушителей, за исключением п. 6 табл. 6 (на двигатель Lycoming O-320-E2A установлен глушитель Gomolzig 74-0501), и роль шума двигателя в общем уровне шума самолетов на местности достаточно велика. Дополнительно надо учитывать, что при увеличении числа лопастей увеличивается интенсивность шума вытеснения и вихревого шума, которые не учитываются в выражении (2) и в табл. 5.

Для самолета Alenia AerMacchi F260 (п. 1 табл. 6) при модификации воздушного винта HC-C2YK-1BF/F8477-8R была изменена форма законцовки, что привело к снижению уровня шума на местности на 1,9 дБА при сертификации на режиме крейсерского полета (п. 6.3 стандарта ИКАО).

Для самолета Pilatus Aircraft PC-12 (п. 7 табл. 6) при установке винта большего диаметра (на 20 %)

получено снижение уровня шума на 2,6 дБА. Данный эффект можно объяснить уменьшением частоты вращения винта для сохранения неизменной окружной скорости и выполнения условия прочности [43] ($nd < 90$ м/с, где n – частота вращения винта (об/с)), что приводит в конечном счете к снижению шума винта.

Влияние двигателей и глушителей

Влияние типа двигателей и наличия глушителей рассмотрено в табл. 7. В крайнем правом столбце представлена величина снижения шума при установке или замене глушителя, а также при замене двигателей по сравнению с базовой модификацией силовой установки.

На основании данных, представленных в табл. 7, можно сделать следующие выводы:

– при установке глушителей в системе выхлопа двигателей уровни шума ЛВС на местности снижаются на величину от 1,7 до 10,3 дБА, а в среднем на 4,6 дБА;

– при наличии глушителей в выхлопном тракте иногда для большего снижения шума самолета в процессе эксплуатации устанавливают новые, более эффективные глушители. Их эффективность выше, чем у штатных на 2,5–5,2 дБА, а в среднем на 3,7 дБА в составе силовой установки ЛВС.

Для сверхлегких самолетов в процессе эксплуатации может оказаться, что выбранный двигатель обладает существенно большей располагаемой мощностью, чем необходимо для эксплуатации самолета, и в этом случае двигатель может заменяться на менее мощный. Данное изменение типовой конструкции является основным, и возникает необходимость получения нового сертификата типа на самолет, обеспечивая выполнение комплекса сертификационных испытаний, в том числе и акустических.

На основе анализа базы данных сертификационных акустических испытаний EASA были выявлены два таких самолета.

На самолете S.E.A.P.R. ATL с максимальной взлетной массой 580 кг (п. 3 табл. 7) при замене двигателя Limbach L 2000 DA 2 [44] на двигатель Societe JPX 4T60/A [45] получено снижение уровня шума на 3,3 дБА при сертификации по п. 6.3, что объясняется меньшей на 7,2 кВт располагаемой мощностью при одинаковой частоте вращения коленвалов двигателей (3200 об/мин), соответствующей взлетному режиму работы СУ.

При замене на самолете E.I.S. AIRCRAFT RF 4D с максимальной взлетной массой 390 кг (п. 8 табл. 7) двигателя Limbach 1700 ED 2 на Sauer

Таблица 6

Влияние числа лопастей и диаметра воздушного винта (все самолеты с тянущей компоновкой воздушного винта, все без глушителей, за исключением п. 6 — на двигатель Luscombing O-320-E2A установлен глушитель Gopozlig 74-0501)

№ п/п	Держатель сертификата типа	Обозначение типа самолета	М, кг	Количество и тип двигателей на ЛВС	Двигатель		Воздушный винт				Пункт стандарта ИКАО	ΔOASPL, дБА
					Производитель	Обозначение	Производитель	Обозначение	Число лопастей	Диаметр, м		
1	Alenia Aermacchi	F260	1102	1хДВС	Luscombing	O-540-E4A5	Hartzell Propeller	HC-C2YK-1BF/F8477-8R	2	1,93	6.3	—
							Hartzell Propeller	HC-C2YK-1BF/F8477-8R (Новая законцовка)	2	1,93		
							Hoffmann Propeller	HO-V123K-180R+5	3	2		
2	Beechcraft Corporation	200 (King Air)	5670	2хТВД	Pratt & Whitney Canada	PT6A	Hartzell Propeller	HC-B3TN-3G/T10178(N)B-3R	3	2,5	6.3	—
							Hartzell Propeller	HC-D4N-3A/D9383K	4	2,39		
3	CERVA	CERVA CE 43	1460	1хДВС	Luscombing	IO-540-C4B5	Hartzell Propeller	HO-V123K-F-200AH-7	2	2,032	6.3	—
							Hoffmann Propeller	HO-V123K-F-200AH-7	3	2		
4	Costruzioni Aeronautiche Tecnam	P2008 JC	650	1хДВС	Rotax	912 S2	GT Propellers	GT-2/173/VRR-FW101 SRTC	2	1,73	10.4b	—
							Hoffmann Propeller	HO-17-GHM-A-174-177-C	3	1,74		

Окончание табл. 6

№ п/п	Держатель сертификата типа	Обозначение типа самолета	М, кг	Количество и тип двигателей на ЛВС	Двигатель		Воздушный винт				Пункт стандарта ИКАО	ΔOASPL, дБА
					Производитель	Обозначение	Производитель	Обозначение	Число лопастей	Диаметр, м		
5	DAHER AEROSPACE	TBM700 N	3354	1хТВД	Pratt & Whitney Canada	PT6A-66D	Hartzell Propeller	HC-E4N-3/E9083 S(K)	4	2,286	10.4b	—
							MT-Propeller Entwicklung	MTV-27-1-E-C-F-R(P)/CFR225-55f	5	2,25		
6	EADS PZL "Warszawa-Okecie"	PZL-Kolibri 150	850	1хДВС	Lycoming	O-320-E2A	Sensenich	74DM6-0-58	2	1,88	10.4a	—
							MT-Propeller Entwicklung	MTV-18-C/175-36	3	1,75		
7	Pilatus Aircraft	PC-12	4100	1хТВД	Pratt & Whitney Canada	PT6A-67B	Hartzell Propeller	HC-E5A-3A/NC10245B	5	2,16	10.4b	—
							MT-Propeller Entwicklung	MTV-27-1-N-C-F-R(P)/CFR260-65a	5	2,6		
8	Piper Aircraft	PA-46R-350T	1969	1хДВС	Lycoming	TIO-540-AE2A	Hartzell Propeller	HC-I3Y1R-1N/N76050)+2	3	2,03	10.4b	—
							MT-Propeller Entwicklung	MTV-14-B/195-30b	4	1,95		
9	Symphony Aircraft Industries	OMF-100-160	975	1хДВС	Lycoming	O-320-D2A	MT-Propeller Entwicklung	MT 186 R 140-3D	2	1,86	10.4b	—
							MT-Propeller Entwicklung	MTV-12-C/180-17f	3	1,8		
10	XtremeAir	XA41	999	1хДВС	Lycoming	AEIO-580-B1A	MT-Propeller Entwicklung	MTV-9-B-C/C203-20d	3	2,03	10.4b	—
							MT-Propeller Entwicklung	MTV-14-B-C/C190-130	4	1,9		

Таблица 7

Влияние двигателей и глушителей (все самолеты однодвигательные с тянущей компоновкой воздушного винта)

№ п/п	Держатель сертификата типа	Обозначение типа ВС	M, кг	Двигатель		Глушитель шума выхлопа		Воздушный винт		Пункт стандарта ИКАО	ΔOASPL, дБА
				Производитель	Обозначение	Производитель	Обозначение	Производитель	Обозначение		
1	Alenia Aermacchi	F260	1102	Lycoming	O-540-E4A5	—	—	MT-Propeller Entwicklung	MTV-9-B/188-50	10,4b	— 2
2	AERODIF	CAP10B	830	Lycoming	AEIO-360-B2F	Gomolzig	—	Hoffmann Propeller	HO-29-HM-180-170	6,3	— 2,5
3	C.E.A.P.R.	ATL	580	Limbach Societe JPX	L 2000 DA 2 4T60/A	—	—	MT-Propeller Entwicklung	155 L 80-1(A)	6,3	— 3,3
4	C.E.A.P.R.	DR 400/180 R	1000	Lycoming	O-360-A3A	Standard Standard + APR 1/4 onde	—	Sensenich	76EM8S5-0-58	6,3	— 4
5	C.E.A.P.R.	DR 400/180 R	1000	Lycoming	O-360-A3A	Hirth Gomolzig	FVA-23-V2 74-0301	Hoffmann Propeller	HO 27HM-180() 160()	6,3	— 5,2
6	Cessna Aircraft Company	Cessna FA 150 M	726	Teledyne Continental	O-200-A	Gomolzig Liese	C150-606500 2x60x150	McCaughey	1A102/ OCM6948	10,4a	— 2,1
7	Diamond Aircraft Industries	HK 36 TTS	770	BRP - Rotax	914	Diamond Aircraft Bombardier-Rotax	— DAI-1 TM 914-06	MT-Propeller Entwicklung	MTV-21-A-C-F/CF175-05	10,4a	— 6 10,3

Окончание табл. 7

№ п/п	Держатель сертификата типа	Обозначение типа ВС	M, кг	Двигатель		Глушитель шума выхлопа		Воздушный винт		Пункт стандарта ИКАО	ΔOASPL, дБА
				Производитель	Обозначение	Производитель	Обозначение	Производитель	Обозначение		
8	E.I.S. AIRCRAFT	RF 4D	390	Limbach	L 1700 ED 2	—	—	MT-Propeller Entwicklung	MT 133 L 100-1A	10.4a	—
				Sauer Flugmotorenbau	S 1800-1-ES0	—	—				6,6
9	Fuji Heavy Industries Ltd.	FA200-180	1150	Lycoming	IO-360-BIB	Liese	2xV60-55	McCauley	B2D34C53-0/0-74E-0	10.4a	—
						Gomolzig	FA200-606500				2,8
10	Fuji Heavy Industries Ltd.	FA200-180	1150	Lycoming	IO-360-BIB	—	—	MT-Propeller Entwicklung	MTV-12-B/183-17	10.4a	—
						Gomolzig	FA200-606500				4,5
11	Maule Aerospace Technology	M-6-235	1134	Lycoming	O-540-J3A5	—	—	MT-Propeller Entwicklung	MTV-9-B/198-52	10.b	—
						Gomolzig	MX7-606500				3,9
12	Piper Aircraft	PA-28-140	967	Technify Motors	TAE 125-02-99	—	—	MT-Propeller Entwicklung	MTV-6-A/187-129	10.b	—
						Akrapovic	—				1,7
13	Textron Aviation	172F	1043	Technify Motors	TAE 125-02-114	—	—	MT-Propeller Entwicklung	MTV-6-A/190-69	10.b	—
						Langer	LA 48				6,3

Flugmotorenbau S 1800-1-ES0 получено снижение уровня шума на местности на 6,6 дБА при сертификации по п. 10.4а. Эффект снижения шума в данном случае можно объяснить следующим образом. Располагаемая мощность двигателя Limbach 1700 ED 2 [46] на взлетном режиме работы составляет 50 кВт при частоте вращения коленвала 3600 об/мин, а двигателя Sauer Flugmotorenbau S 1800-1-ES0 [47] — 44 кВт при частоте вращения коленвала 3000 об/мин. Поскольку новый двигатель менее мощный и частота вращения коленвала на взлетном режиме меньше, следовательно, меньше и тяга винта при меньшей окружной скорости, и силовая установка менее шумная за счет снижения шума и двигателя и воздушного винта.

Выводы

Рассмотрена проблема шума на местности легких винтовых самолетов. Показаны роль и место аэроакустических исследований при проектировании нового самолета. На основе анализа базы данных акустических сертификационных испытаний EASA показано, что для современных ЛВС, сертифицируемых согласно п. 10.4b стандарта ИКАО, величина среднего по всем самолетам запаса по уровням шума на местности составляет 6 дБА. Рассмотрено влияние числа лопастей и диаметра воздушного винта, а также располагаемой мощности силовой установки и наличия глушителей шума выхлопа ДВС на уровни шума самолетов на местности.

Представленная структура работ в области аэроакустики при проектировании ЛВС может быть использована также при проектировании винтовых беспилотных воздушных судов самолетного типа. Требования к беспилотному воздушному судну должны дополнительно учитывать степень его слышимости и заметности [48, 49], а летные испытания в данном случае будут являться предварительными (доводочными).

Библиографический список

1. Международные стандарты и Рекомендуемая практика. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. — 7-е изд. — Монреаль, Канада. ИКАО, 2014. Т. 1. Авиационный шум. — 258 с.
2. Авиационные Правила. Ч. 36. Сертификация воздушных судов по шуму на местности / Межгосударственный авиационный комитет. — М.: Авиатиздат, 2003. — 122 с.
3. Самохин В.Ф., Мунин А.Г., Кузнецов В.С. Экология предъявляет свои требования гражданской авиации // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2009. № 1. С. 9–13.
4. Дмитриев В.Г., Мунин А.Г., Самохин В.Ф., Чернышев С.Л. О приоритетах в гражданской авиации // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2009. № 10. С. 15–22.
5. 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.
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. Мошков П.А. Проблемы проектирования гражданских самолетов с учетом требований по шуму в салоне // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 28–41. DOI: 10.34759/vst-2019-4-28-41
8. Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А. Проблемы снижения шума, создаваемого на местности самолетами с турбовинтовентиляторными двигателями // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 126–128.
9. EASA certification noise levels. URL: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/easa-certification-noise-levels>
10. ГОСТ 22283-2014. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения. — М.: Стандартинформ, 2015. — 13 с.
11. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. 1996.
12. Кажан В.Г., Мошков П.А., Самохин В.Ф. Природный фон при проведении акустических испытаний самолетов на аэродроме базирования малой авиации // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 7. С. 146–170. DOI: 10.7463/0715.0782827
13. Картышев О.А., Николайкин Н.И. Проекты санитарно-защитных зон аэропортов, аэродромов, вертодромов и посадочных площадок как основа оценки соответствия их деятельности экологическим требованиям // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 4. С. 146–155.
14. Картышев О.А., Николайкин Н.И. Критерии оценки авиационного шума для зонирования приаэродромной территории аэропортов и обоснования защитных мероприятий // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 3. С. 30–40.
15. Замтфорт Б.С., Медведев Ю.В. Использование эксплуатационных процедур пилотирования при взлете и посадке самолета для снижения уровня шума, создаваемого самолетом на местности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 6. С. 309–310.

16. *Замтфорт Б.С., Медведев Ю.В.* Оптимизация методов пилотирования самолёта во взлётно-посадочном цикле для уменьшения площади его звукового следа // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3-1 (34). С. 39-43.
17. *Мошков П.А.* Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 101-106.
18. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Экспериментальное определение роли поршневого двигателя в суммарном шуме силовой установки легкого винтового самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 50-61.
19. *Мошков П.А.* Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАИ, 2015. — 143 с.
20. ГОСТ Р 58849-2020 Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2020. — 61 с.
21. *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.
22. *Гранич В.Ю., Дутов А.В., Мирошкин В.Л., Сытало К.И.* Об уровнях готовности технологий и применении калькулятора УГТ для их оценивания // Экономика науки. 2020. Т. 6. № 1-2. С. 6-10.
23. *Анисимов К.С., Кажан Е.В., Курсаков И.А., Лысенков А.В., Подаруев В.Ю., Савельев А.А.* Разработка облика самолета с использованием высокоточных методов вычислительной аэродинамики и оптимизации // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 7-19.
24. *Барвинок В.А.* и др. Современные технологии в авиа- и ракетостроении: Учебник для студентов высших учебных заведений. — М.: Машиностроение, 2014. — 401 с.
25. *Сиротин Н.Н.* и др. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS-технологий: Учебник для студентов вузов: В 3-х кн. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 2011-2012.
26. *Погосян М.А., Братухин А.Г., Савельевских Е.П., Стрелец Д.Ю., Злыгарев В.А.* CALS-технологии при создании самолета SSJ100 // Вестник машиностроения. 2017. № 5. С. 60-65.
27. *Братухин А.Г.* (гл. ред.) Авиационно-космическое машиностроение: Международная энциклопедия CALS-технологий. — М.: НИЦ АСК, 2015. — 608 с.
28. *Копьев В.Ф., Титарев В.А., Беляев И.В.* Разработка методологии расчета шума винтов с использованием суперкомпьютеров // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 2. С. 78-106.
29. *Титарев В.А., Фараинов Г.А., Чернышев С.А., Батраков А.С.* Численное моделирование влияния взаимного расположения винта и пилона на шум турбовинтового самолета // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 6. С. 737-751. DOI: 10.1134/S0320791918060126
30. *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.
31. *Hubbard H.H.* Aeroacoustics of flight vehicles: Theory and Practice. Vol. 1 "Noise sources". — NASA References Publication 1258. 1991. WRDC. Technical report 90-3052. — 606 p.
32. *Yu P., Peng J., Bai J., Han X., Song X.* Aeroacoustic and aerodynamic optimization of propeller blades // Chinese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 33. No. 3, pp. 826-839. DOI: 10.1016/j.cja.2019.11.005
33. *Drobietz R., Neuwerth G.* Noise reduction potential of swept propeller blades // Proceedings of CEAS Forum on Aeroacoustics of rotors and propellers (09-11 June 1999; Rome, Italy), pp. 65-77.
34. *Самохин В.Ф.* Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 5. С. 1064-1072.
35. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Интегральная модель шума силовой установки легкого винтового самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 36-44.
36. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Оценка влияния числа лопастей и диаметра на шум воздушного винта // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 3. С. 25-34. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-25-34
37. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Методы снижения шума и заметности беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 38-48.
38. Hartzell Propeller Inc. Manual revision transmittal. No.159, Rev. 49. 2015. 1656 p.
39. HOFFMANN GmbH & Co. KG. Operation and maintenance manual. No. E 287 A. HO-V 123 () Series. Constant Speed Propeller. 2002. 38 p.
40. HOFFMANN GmbH & Co. KG. Operation and maintenance manual. No. E 0110.74. HO() Series, HO4() Series. Fixed pitch propeller. 2002. 20 p.
41. GT Propellers. URL: <https://www.gt-propellers.com>
42. MT-Propeller. URL: <https://www.mt-propeller.com/en/entw/products.htm>
43. *Остроухов С.П.* Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. — М.: Физматлит, 2014. — 328 с.
44. Limbach Flugmotoren GmbH & Co. KG. Operating and Maintenance Manual Limbach L 2000 Engine for Powered Gliders and Very Light Aircraft. 2016. 48 p.

45. Motores JPX 4T60 Caracteristicas Engines. URL: <http://www.ultraligero.net/Descargas/Manuales/JPX/4t60.htm>
46. Limbach Flugmotoren GmbH & Co. KG. Operating and Maintenance Manual Limbach L 1700 Engine for Powered Gliders and Very Light Aircraft. 2016. 48 p.
47. S 1800 -1-ES1 S 1800 -1-ES1C S 1800 -1-RS1 – Sauer Motoren. URL: <http://www.sauer-flugmotorenbau.de/resources/DatenblattS1800neu.pdf>
48. Мoшкoв П.А., Сaмoхин В.Ф., Якoвлев А.А. Выбор критерия слышимости беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 2. С 3–9.
49. Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A. Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2019. Paper No. 2019–2514. DOI: 10.2514/6.2019-2514

PROBLEMS OF LIGHT PROPELLER-DRIVEN AIRPLANE DESIGN WITH REGARD TO COMMUNITY NOISE REQUIREMENTS

Moshkov P.A.^{1*}, Samokhin V.F.^{2**}

¹ IRKUT Corporation Regional Aircraft,

26, Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russia

² Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),

1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia

* e-mail: moshkov89@bk.ru, p_moshkov@ssj.irkut.com

** e-mail: samohin_vf@mail.ru

Abstract

Recently, the tendency towards International Regulatory Requirements on civil aircraft community noise toughening is being observed. Modern manned aerial vehicles under design should be less noisy than the aircraft being operated at present. Modern aircraft design is being performed with regard to current and prospective International regulations on the community noise. Thus, the urgency of the acoustic design issue provision in the framework of the civil aircraft lifetime is beyond any doubt.

At the same time, information on what works should be performed at various stages of the new light propeller-driven airplane creation to ensure its successful certification on the community noise and competitiveness at the world market is not presented in published works. The purpose of the presented work consists in concept forming of light propeller-driven airplane design in the framework of the product lifecycle, as well as analysis of the EASA (European Aviation Safety Agency) certification test database to determine requirements to the aircraft being designed and the effect of various factors on certification noise levels

The article demonstrates the role and place of aero-acoustic studies in the new aircraft design. Based on the EASA acoustic certification test database analysis, the article revealed that the value of noise level margin, average for all light propeller-driven

airplanes, being certified according to the clause 10.4b of the ICAO Standard, was 6 dBA. The impact of blades number and propeller diameter, as well as apparent power of the power plant and presence of exhaust noise silencers of the internal combustion engine on the airplanes community noise was considered.

The presented structure of works in the field of aero-acoustics while the a light propeller-driven aircrafts design can be employed in the design of propeller-driven unmanned aerial vehicles of an airplane type as well. Requirements to the unmanned aerial vehicles should additionally account for the degree of its audibility and acoustic signature, and flight tests in this case will be preliminary (developmental) test.

Keywords: light propeller-driven aircraft, community noise, aero-acoustics design, noise reduction technologies.

References

1. *Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation*, Montreal, Kanada, ICAO, 2011. Vol. 1 “Aircraft Noise”, 227 p.
2. *Aviatsionnye Pravila. Chast’ AP-36, Sertifikatsiya vozдушnykh sudov po shumy na mestnosti* (Aviation Regulations. Part of the AP-36, Aircraft community noise Certification), Mezghosudarstvennyi aviatsionnyi komitet, 2003.

3. Samokhin V.F., Munin A.G., Kuznetsov V.S. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2009, no. 1, pp. 9–13.
4. Dmitriev V.G., Munin A.G., Samokhin V.F., Chernyshev S.L. *Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2009, no. 10, pp. 15–22.
5. Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Khaletskii Yu.D. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2019, no. 4, pp. 3–18.
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. Moshkov P.A. Problems of civil aircraft design with regard to cabin noise requirements, *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no 4, pp. 28–41. DOI: 10.34759/vst-2019-4-28-41
8. 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.
9. *EASA certification noise levels*. available at: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/easa-certification-noise-levels>
10. *Shum aviatsionnyi. Dopustimye urovni shuma na territorii zhiloi zastroiki i metody ego izmereniya, GOST 22283-2014* (Aviation noise. Acceptable noise levels in residential areas and methods for measuring it. State Standard 22283-2014), Moscow, Standartinform, 2015, 13 p.
11. *Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloi zastroiki. Sanitarnye normy, SN 2.2.4/2.1.8.562-96* (Noise at the workplace, in residential and public buildings, and on the territory of residential development. Sanitary code no. SN 2.2.4/2.1.8.562-96). 1996.
12. Kazhan V.G., Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana*, 2015, no. 7, pp. 146–170. DOI: 10.7463/0715.0782827
13. Kartyshev O.A., Nikolaikin N.I. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 146–155.
14. Kartyshev O.A., Nikolaikin N.I. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 30–40.
15. Zamtfort B.S., Medvedev Yu.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 6, pp. 309–310.
16. Zamtfort B.S., Medvedev Yu.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2012, no. 3-1 (34), pp. 39-43.
17. Moshkov P.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2015, no. 4, pp. 101-106.
18. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Experimental determination of piston engine share in the light propeller aircraft power plant total noise, *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 50–61.
19. Moshkov P.A. *Prognozirovanie i snizhenie shuma na mestnosti legkikh vintovykh samoletov* (Community noise prediction and reduction of light propeller-driven aircraft), PhD thesis, Moscow, MAI, 2015, 143 p.
20. *Aviatsionnaya tekhnika grazhdanskogo naznacheniya. Poryadok sozdaniya. Osnovnye polozheniya. GOST R 58849-2020* (Civil aeronautical engineering. Order of creation. Fundamentals. State Standard R 58849-2020), Moscow, Standartinform, 2020, 61 p.
21. Dmitriev V.G., Samokhin V.F. Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise, *TsAGI Science Journal*, 2014, vol. 45, no. 3-4, pp. 367–388.
22. Granich V.Yu., Dutov A.V., Miroshkin V.L., Sypalo K.I. *Ekonomika nauki*, 2020, vol. 6, no. 1–2, pp. 6–10.
23. Anisimov K.S., Kazhan E.V., Kursakov I.A., Lysenkov A.V., Podaruev V.Yu., Savel'ev A.A. Aircraft layout design employing high-precision methods of computational aerodynamics and optimization, *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 2–19.
24. Barvinok V.A. et al. *Sovremennye tekhnologii v avia- i raketostroenii* (Modern technologies in aircraft and rocket engineering), Moscow, Mashinostroenie, 2014, 320 p.
25. Sirotin N.N. et al. *Osnovy konstruirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok v sisteme CALS-tekhnologii* (Fundamentals of design, production and operation of aviation gas turbine engines and power plants in CALS-technologies system), Moscow, Nauka, 2011-2012.
26. Pogosyan M.A., Bratukhin A.G., Savel'evskikh E.P., Strelets D.Yu., Zlygarev V.A. *Vestnik mashinostroeniya*, 2017, no. 5, pp. 60–65.
27. Bratukhin A.G. (ed.) *Mezhdunarodnaya ehntsiklopediya CALS-tekhnologii "Aviatsionno-kosmicheskoe mashinostroenie"* (International encyclopedia of "Aerospace engineering" CALS technologies), Moscow, NITSASK, 2015, 608 p.
28. Kop'ev V.F., Titarev V.A., Belyaev I.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2014, vol. 45, no. 3-4, pp. 293–372.
29. Titarev V.A., Faranosov G.A., Chernyshev S.A., Batrakov A.S. Numerical modeling of the influence of the relative positions of a propeller and pylon on turboprop aircraft noise, *Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 6, pp. 760-773. DOI: 10.1134/S0320791918060126
30. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Effect of spacing between pusher propeller and wing on environmental light aircraft noise, *TsAGI Science Journal*, 2016, vol. 47, no. 6, pp. 639–647. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2017019465
31. Hubbard H.H. Aeroacoustics of flight vehicles: Theory and Practice. Vol. 1 "Noise sources", *NASA References Publication 1258*, 1991, vol.1, WRDC, Technical report 90-3052, 606 p.
32. Yu P., Peng J., Bai J., Han X., Song X. Aeroacoustic and aerodynamic optimization of propeller blades, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, vol. 33, no. 3, pp. 826–839. DOI: 10.1016/j.cja.2019.11.005
33. Drobiez R., Neuwerth G. Noise reduction potential of swept propeller blades, *Proceedings of CEAS Forum*

- on *Aeroacoustics of rotors and propellers* (09-11 June 1999; Rome, Italy), pp. 65–77.
34. 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.
 35. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Propeller-driven light aircraft power plant noise Integral model, *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 36–44.
 36. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 3, pp. 25–34. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-25-34
 37. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Noise and acoustic signature reduction methods for unmanned aerial vehicles with engine-propeller power plant, *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no.1, pp. 38–48.
 38. Hartzell Propeller Inc. *Manual revision transmittal*, no.159, Rev. 49, 2015, 1656 p.
 39. HOFFMANN GmbH & Co. KG. *Operation and maintenance manual*, no. E 287 A. HO-V 123 () Series. Constant Speed Propeller, 2002, 38 p.
 40. HOFFMANN GmbH & Co. KG. *Operation and maintenance manual*. No. E 0110.74. HO() Series, HO4() Series. Fixed pitch propeller, 2002, 20 p.
 41. *GT Propellers*, available at: <https://www.gt-propellers.com>
 42. *MT-Propeller*, available at: <https://www.mt-propeller.com/en/entw/products.htm>
 43. Ostroukhov S.P. *Aerodinamika vozdukhnykh vintov i vintokol'tsevykh dvizhitelei* (Aerodynamics of propeller, and screw-ring propulsors), Moscow, Fizmatlit, 2014, 328 p.
 44. Limbach Flugmotoren GmbH & Co. KG. *Operating and Maintenance Manual Limbach L 2000 Engine for Powered Gliders and Very Light Aircraft*, 2016, 48 p.
 45. *Motores JPX 4T60 Caracteristicas Engines*, available at: <http://www.ultraligero.net/Descargas/Manuales/JPX/4t60.htm>
 46. Limbach Flugmotoren GmbH & Co. KG. *Operating and Maintenance Manual Limbach L 1700 Engine for Powered Gliders and Very Light Aircraft*, 2016, 48 p.
 47. *S 1800 -1-ES1 S 1800 -1-ES1C S 1800 -1-RS1 – Sauer Motoren*, available at: <http://www.sauer-flugmotorenbau.de/resources/DatenblattS1800neu.pdf>
 48. 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. DOI: 10.3103/S1068799818020010
 49. Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A. Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions, *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2019, AIAA Paper no. 2019–2514. DOI: 10.2514/6.2019-2514