

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ШУМА И ЗАМЕТНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ВИНТОМОТОРНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Мошков П.А.^{1*}, Самохин В.Ф.^{2**}

¹ «Гражданские самолеты Сухого»,

ул. Поликарпова, 23Б, корп. 2, Москва, 125284, Россия

² Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского,

ЦАГИ, ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия

* e-mail: moshkov89@bk.ru

** e-mail: samohin_vf@mail.ru

Рассмотрены основные методы снижения шума винтомоторных силовых установок беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолетного типа, включающих в себя одиночные воздушные винты различной конструкции и компоновки и поршневые двигатели. На основании полуэмпирической модели предложены выражения для оценки влияния диаметра и числа лопастей на тональные составляющие шума воздушного винта при условии постоянства тяги. Акустические испытания, выполненные на аэродроме Московского авиационного института, в целом качественно подтвердили полученные соотношения. В качестве примера обеспечения снижения шума и заметности выполнена расчетно-экспериментальная оценка влияния диаметра воздушного винта на границы заметности малоразмерного БПЛА. Сформулированы пути дальнейших исследований для решения задачи создания малозаметных силовых установок для этих летательных аппаратов.

Ключевые слова: акустическая заметность, слышимость летательных аппаратов, обнаруживаемость, беспилотный летательный аппарат, шум воздушного винта, шум поршневого двигателя, винтомоторная силовая установка, методы снижения шума, акустическая локация.

Введение

Проблеме снижения акустической заметности беспилотных летательных аппаратов с винтовыми движителями начали уделять внимание еще в 70–80-х годах прошлого века [1, 2]. Но особенно актуальной и приоритетной данная тематика стала в последние годы в связи с широким использованием боевых авиационных систем с беспилотными комплексами, решающими разведывательные и ударные задачи, для которых особенно важно обеспечить низкие показатели акустической заметности.

Для существенного снижения уровня шума и заметности летательного аппарата с поршневым двигателем на местности необходим комплексный подход, заключающийся в снижении шума силовой установки (СУ), т.е. шума, излучаемого воздушным винтом и двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Снижение шума воздушного винта является достаточно сложной задачей, решение ее основано на оптимизации геометрических, аэродинамических и акустических характеристик воздушного винта. Ин-

тенсивность акустического излучения винта при условии сохранения неизменной тяги можно снизить за счет оптимизации соотношения между числом лопастей, диаметром винта и величиной окружной скорости по критерию минимальной мощности акустического излучения. Для существенного снижения шума двигателя внутреннего сгорания, как правило, используют глушители шума впуска и выхлопа и различные капоты, в том числе виброизолирующие и с вибропоглощающим покрытием.

Роль различных источников в суммарном шуме винтомоторной силовой установки зависит от многих факторов. Для существенного снижения шума и заметности БПЛА на местности необходимо воздействовать в первую очередь на источники шума, доминирующие при работе силовой установки на крейсерском режиме полета. Ранее [3] было выполнено экспериментальное определение роли различных источников в суммарном шуме авиационных поршневых силовых установок, позволившее определить влияние режима работы и других факторов

на роль основных источников в суммарном шуме винтомоторной силовой установки.

Данная работа обобщает результаты исследований авторами статьи акустических характеристик и методов снижения шума винтомоторных СУ, включающих в себя одиночные воздушные винты различной конструкции и компоновки и бензиновые поршневые двигатели с внешним смесеобразованием [4—14], а также дополняет и обобщает эти данные с результатами исследований других авторов [15—23].

Методы снижения шума винтомоторных силовых установок

Методы снижения шума воздушного винта

В последние годы были опубликованы работы по аэроакустической оптимизации воздушных винтов, в основе которых лежит численное моделирование процессов генерации шума [24—30]. Полученные результаты относятся к ограниченной области изменения конструктивных параметров винтов и компоновочных решений. Поэтому важную роль в решении задачи оптимизации играют экспериментальные исследования и полуэмпирическое моделирование процессов генерации шума. Ниже рассмотрены некоторые результаты расчетно-экспериментального исследования [4,5,12] влияния основных геометрических параметров и компоновки воздушного винта на самолете на акустические характеристики.

Влияние числа лопастей и диаметра

Увеличение числа лопастей при условии сохранения геометрического и аэродинамического подобия винтов, а также при постоянстве числа Маха окружной скорости приводит к существенному снижению интенсивности гармонической составляющей шума от аэродинамической нагрузки. Интенсивности других составляющих шума — гармонических составляющих шума «вытеснения» и широкополосной составляющей шума винта — при этом изменяются незначительно. На основе анализа полуэмпирической модели шума воздушного винта [31, 32] 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 постоянстве числа Маха окружной скорости [5].

Расчетное изменение уровня звуковой мощности шума от аэродинамической нагрузки ΔL_{W_p} записывается в виде

$$\Delta L_{W_p} = L_{W_{p2}} - L_{W_{p1}} = 20 \lg \frac{d_1}{d_2} + 50 \lg \frac{z_1}{z_2}. \quad (1)$$

Для шума вытеснения $\Delta L_{W_{u_n}}$ соотношение имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta L_{W_{u_n}} &= L_{W_{u_n2}} - L_{W_{u_n1}} = \\ &= 20 \lg \frac{d_2}{d_1} + 10 \lg \frac{z_2}{z_1} + 10 \lg \frac{(M_{окр2}^2 + M_{п2}^2)}{(M_{окр1}^2 + M_{п1}^2)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где d — диаметр винта, м; z — число лопастей; $M_{окр}$ — число Маха окружной скорости воздушного винта; $M_{п}$ — число Маха полета.

Стоит отметить, что представленные выражения справедливы только для воздушных винтов, работающих в области автомодельных $Re > 10^6$ течений [33, 34].

Измерения акустических характеристик легкомоторных самолетов Як-18Т с двух- и трехлопастными винтами, МАИ-223М и F30, выполненные на аэродроме Московского авиационного института в статических условиях, качественно подтвердили расчетные оценки влияния диаметра и числа лопастей на шум воздушного винта.

На рис. 1 представлено сравнение измеренных суммарных уровней звуковой мощности СУ самолета

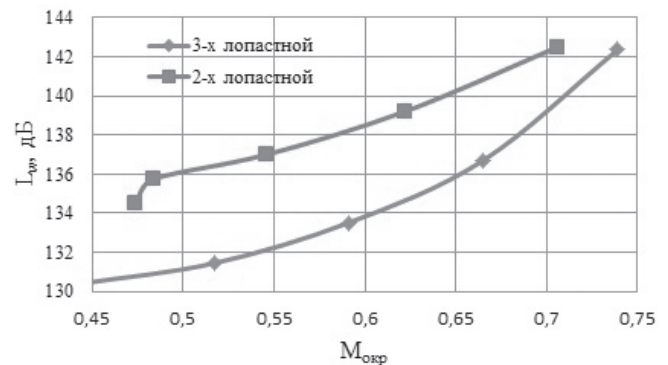


Рис. 1. Сравнение измеренных суммарных уровней звуковой мощности СУ самолета Як-18Т с двух- и трехлопастными винтами в зависимости от числа Маха окружной скорости

летов Як-18Т с двух- и трехлопастными винтами диаметрами 2,4 и 2,5 м соответственно при условии равенства тяг при одинаковых окружных скоростях. Поскольку на самолетах устанавливается один и тот же двигатель М-14П, можно полагать, что на сходственных режимах работы роль поршневого двигателя будет одинаковой для обоих СУ, и поэтому данные рис. 1 качественно характеризуют

ют влияние числа лопастей и диаметра на шум воздушного винта. Можно видеть, что при пониженных режимах работы ($M_{\text{окр}} \sim 0,5$) увеличение числа лопастей приводит к существенному, ~ 5 дБ, снижению шума силовой установки. Но поскольку при повышении режима работы намного возрастает роль шума вытеснения в суммарном шуме воздушного винта, то суммарное снижение шума за счет увеличения числа лопастей и диаметра при $M_{\text{окр}} > 0,7$ составляет ~ 2 дБ.

Для воздушного винта самолета Як-18Т расчетное суммарное снижение шума от аэродинамической нагрузки при увеличении числа лопастей и диаметра составляет ~ 9 дБ, что согласуется с экспериментальными данными при пониженных режимах работы. Для шума вытеснения расчетное возрастание за счет увеличения числа лопастей и диаметра ~ 2 дБ.

Отметим, что экспериментальные данные (рис. 1) хорошо согласуются с результатами расчетного исследования по модели Л.Я. Гутина [35, 36], представленными в работе [37].

В то же время увеличение числа лопастей приводит к смещению в спектре излучения частот гармонических составляющих в высокочастотную область, и поэтому при оценке шума и заметности в единицах дБА можно не достигнуть существенного эффекта снижения шума. Также смещение тональных составляющих в сторону более высоких частот может привести к снижению маскирующего эффекта шума БПЛА природным акустическим фоном, который является хорошим маскером низкочастотного шума ЛА при умеренных скоростях ветра [38]. Отметим также, что увеличение числа лопастей приводит к заметному снижению акустического КПД винтомоторных силовых установок.

В результате исследования влияния диаметра на шум воздушного винта на самолетах МАИ-223М и F30 в статических условиях было установлено, что уменьшение диаметра винта на 3–5% (при незначительном увеличении шага для сохранения постоянной тяги на взлетном режиме) приводит к снижению шума винта на $\sim 1,5$ дБ [4] в широком диапазоне режимов работы (рис. 2). Таким образом, незначительное уменьшение диаметра винта без изменения формы лопасти в плане может рекомендоваться как один из методов снижения шума и заметности БПЛА с винтомоторными силовыми установками.

Влияние формы лопасти в плане

Еще одним способом уменьшения шума винта является изменение формы концевой части лопасти (рис. 3). Такое изменение формы приводит к

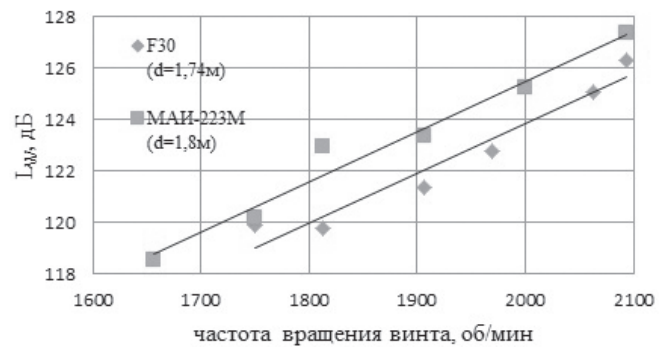


Рис. 2. Снижение суммарного уровня звуковой мощности винта при уменьшении его диаметра при условии сохранения неизменными тяги и частоты вращения при различных режимах работы СУ

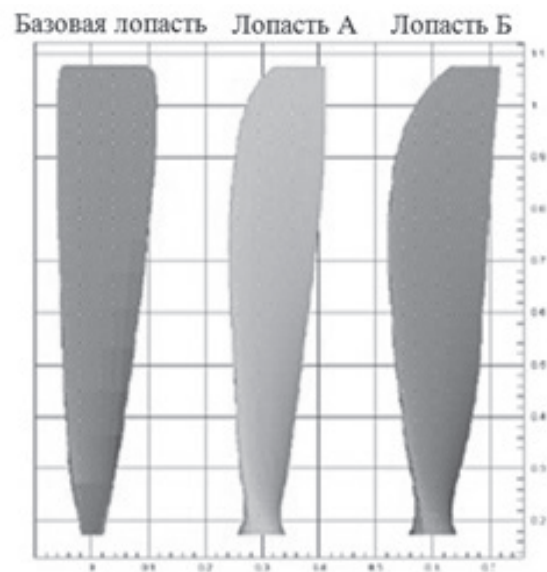


Рис. 3. Типичные формы лопастей малонагруженных винтов легких самолетов и малоразмерных БПЛА

некоторому смещению в сторону втулки максимума радиального распределения аэродинамической нагрузки, т. е. к смещению в область пониженных окружных скоростей. Такая форма показала свою эффективность для случая работы самолетного винта при около- и сверхзвуковых скоростях, а также при исследовании несущих вертолетных винтов [39]. В целом можно отметить, что возможности снижения шума винта за счет изменения формы лопасти зарубежные авторы ограничивают величиной до 3 дБ [15]. Было установлено, что изменение формы лопасти больше влияет на аэродинамические, чем на акустические характеристики винта. В эксперименте [18] получено для лопасти А (рис. 3) с модифицированной передней кромкой конца уменьшение уровня шума до 1,5 дБ по сравнению с базовой лопастью. Лопасть Б не приносит существенного снижения шума, несмотря на более резко выраженную стреловидность в плане.

Как правило, при аэроакустической оптимизации формы лопасти целевой функцией оптимизации является КПД воздушного винта на заданном режиме работы. Для легких винтовых самолетов это режим максимальной тяги, так как на этом режиме осуществляется сертификация самолетов по шуму на местности. Для БПЛА характерным будет режим крейсерского полета. Управляющими параметрами оптимизации являются угол установки лопасти и основные безразмерные геометрические параметры, а ограничениями — тяга и уровень шума. При этом оптимизированный воздушный винт должен быть менее шумным по сравнению с базовым.

Особенности акустики толкающих винтов и методы снижения нестационарной составляющей шума вращения

Расположение винтового движителя в толкающей конфигурации приводит к попаданию вихревого следа от крыла (пилона или хвостового оперения) на воздушный винт. Неравномерный поток, набегающий на винт, приводит к появлению нестационарной составляющей аэродинамической нагрузки на лопастях винта и, как следствие, к изменению аэродинамических и акустических характеристик толкающего воздушного винта по сравнению со случаем изолированного винта.

В результате выполненного авторами летного эксперимента [12] установлено, что увеличение осевого зазора между толкающим винтом и расположенным перед ним крылом приводит к снижению шума винта на гармониках частоты следования лопастей. Результаты летного эксперимента хорошо согласуются с данными зарубежных авторов [19, 20], полученными при испытаниях модели ЛА в аэродинамической трубе. Можно видеть (рис. 4), что при увеличении относительного осевого зазора до $x/c = 0.5$ (x — расстояние между плоскостью диска винта и задней кромкой крыла, c — средняя аэродинамическая хорда крыла) имеет место снижение суммарного по спектру излучения тонального шума на величину до 10 дБ. Увеличение осевого зазора свыше $x/c > 1$ приведет к тому, что влияние вихревого следа за элементами планера на интенсивность шума винта уменьшается на величину до 15 дБ, и различие между уровнями шума изолированного винта и винта в толкающей компоновке становится несущественным. Увеличение осевого зазора может рассматриваться как конструктивный способ снижения шума легких самолетов на местности в компоновке с толкающим винтом.

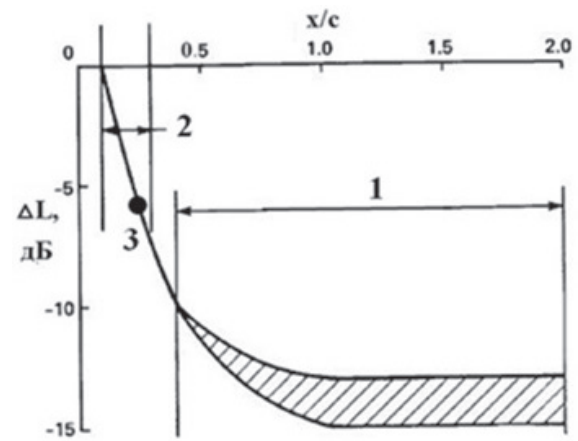


Рис. 4. График затухания гармонических составляющих шума винта с увеличением зазора между винтом и крылом: 1 — данные [19]; 2 — данные [20], Точка 3 на графике — результаты исследования авторов [12]

В целом можно ожидать, что проявление акустических эффектов, связанных с установкой винта в толкающей компоновке, можно снизить или даже полностью удалить, если воздействовать на вихревой след за впереди расположенными элементами планера. В работах [40—42] показано, что вдув воздуха вслед за пилоном (pylon blowing) может существенным образом влиять на степень интенсивности вихревого следа.

Установлено, в частности, что подобное влияние на вихревой след за крылом снижает интенсивность суммарного тонального шума воздушного винта во всем рассматриваемом диапазоне режимов работы. Наибольшее снижение интенсивности шума винта за счет заполнения турбулентного следа (до 7-12 дБ) наблюдается при наиболее полном выравнивании профиля скорости в следе.

Методы снижения шума поршневых двигателей

Основным методом снижения структурного шума поршневого двигателя, не влияющим на рабочий процесс, является его капотирование. Исследование эффективности применения капота было выполнено авторами ранее и результаты представлены в работе [14]. Было показано, что установка капота на двигатель с заглушенным выхлопом уменьшает роль основного тона двигателя в суммарном шуме силовой установки от ~18% до ~3% в широком диапазоне режимов работы. При отсутствии глушителя в системе выхлопа двигателя капотирование двигателя не приводит к снижению интенсивности суммарного акустического излучения, поскольку интенсивность шума системы газообмена при отсутствии глушителя, как правило,

более чем на 10 дБ превышает интенсивность структурного шума [7, 21].

Отметим также, что при установке капота на двигатель необходимо обеспечить его виброизоляцию, чтобы избежать повышенных вибраций, которые могут являться дополнительным источником шума.

Среди других методов снижения структурного шума ДВС отметим также увеличение коэффициента быстроходности при условии постоянства рабочего объема [22], уменьшение угла опережения зажигания и степени сжатия, а также вибродемпфирование оребренных элементов конструкции [23].

Для снижения шума системы газообмена двигателя необходимо применять глушители шума в трактах всасывания и выхлопа ДВС. Если на двигателе уже установлен глушитель шума выхлопа, то представляет интерес рассмотреть возможность установки глушителя с увеличенным, по сравнению со штатным глушителем, объемом резонатора. Увеличение объема резонатора может привести к существенному уменьшению уровней излучаемого шума в области низких и средних частот.

При выборе СУ для легкомоторных самолетов и БПЛА следует учитывать, что двухтактные поршневые двигатели являются доминирующим источником в шуме винтомоторных СУ при отсутствии глушителей в трактах впуска и выхлопа [13].

Экспериментально было установлено влияние формы поперечного сечения выхлопного сопла турбовинтового двигателя [18] на шум винта в толкающей компоновке. Обычно выхлопной патрубков двигателя располагается вблизи втулки винта. Если вместо сопла круглой формы использовать сопло эллиптической формы того же сечения, причем так, чтобы область взаимодействия потока с лопастями сместилась ближе к втулке, то интенсивность шума взаимодействия уменьшится и это приведет к снижению уровня шума силовой установки в целом, в среднем на 3–4 дБ. Аналогично можно ожидать существенного влияния на интенсивность шума винта в толкающей компоновке взаимодействия с лопастями винта выхлопной струи от поршневого двигателя. Необходимо, по возможности, чтобы выхлопные газы отбрасывались в сторону от винта или ближе к втулке винта, где ниже окружная скорость лопастей и, соответственно, меньшее влияние окажет выхлоп на шум винта.

Оценка влияния диаметра винта на границы заметности БПЛА

В качестве примера снижения шума и заметности БПЛА на местности за счет одного из рассмот-

ренных в статье методов была выполнена оценка влияния диаметра винта на границы заметности малоразмерного БПЛА с силовой установкой, аналогичной устанавливаемой на легкомоторные самолеты МАИ-223М и F30.

На рис. 5 представлено сравнение измеренных третьооктавных спектров уровней звукового давления для силовых установок самолетов МАИ-223М и F30. Можно видеть, что суммарное снижение шума СУ за счет уменьшения диаметра на ~1,5 дБ обусловлено уменьшением интенсивности тональ-

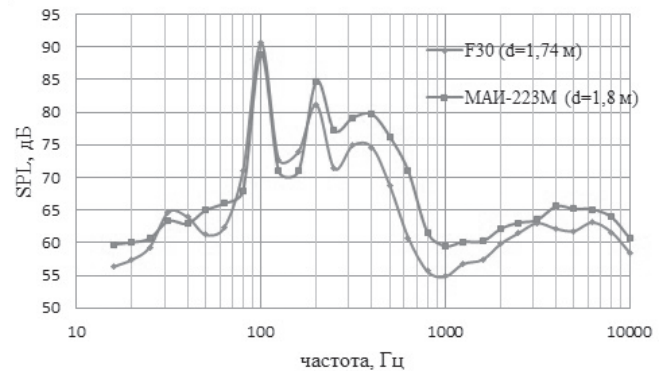


Рис. 5. Влияние диаметра винта на третьооктавный спектр уровней звукового давления ($\Phi = 120^\circ$, частота вращения воздушного винта ~ 2094 об/мин, статические условия, расстояние — 30 м)

ных и широкополосных составляющих шума воздушного винта практически во всем диапазоне рассматриваемых частот (рис. 5).

На основе известных алгоритмов и программ [43], а также экспериментальных данных можно оценить влияние диаметра винта на границы слышимости и заметности БПЛА в условиях стандартной или нестандартной атмосферы [44]. Для условий стандартной атмосферы было получено, что БПЛА с винтом меньшего диаметра, выполняющий крейсерский горизонтальный полет на малой высоте со скоростью 140 км/ч, может приблизиться на ≈ 300 метров к контрольной точке на местности без возможности обнаружения наблюдателем.

Выводы

Рассмотрены основные методы снижения шума авиационных поршневых силовых установок, применяемых на легкомоторных самолетах и беспилотных летательных аппаратах. Представлены формулы, которые могут быть использованы для оценки влияния числа лопастей и диаметра на тональные составляющие шума воздушного винта при условии сохранения аэродинамического подобия и при постоянстве числа Маха окружной скорости. описа-

ны особенности акустики толкающих винтов и предложены методы снижения шума.

В качестве одного из способов снижения шума и заметности рассмотрен вариант уменьшения диаметра воздушного винта БПЛА с поршневым двигателем. Получено, что уменьшение диаметра на 3,3% приводит к уменьшению на ≈ 300 метров расстояния, на которое может приблизиться малоразмерный БПЛА к контрольной точке на местности без возможности обнаружения.

В заключение можно сформулировать основные перспективные направления дальнейших исследований:

1. Исследование эффекта экранирования шума винтомоторной силовой установки элементами планера [45–47] и учет этого эффекта при определении границ слышимости и заметности БПЛА. При исследованиях необходимо учитывать возможную аэродинамическую интерференцию воздушного винта и экранирующей поверхности планера самолета, что может существенным образом влиять на аэродинамические и акустические характеристики воздушного винта в условиях конкретной компоновки. В то же время европейские авторы считают, что за счет экранирования можно добиться снижения шума воздушного винта в условиях реальной компоновки до уровня ниже шума изолированного винта [51].

2. Исследование влияния профилированного кольца на характеристики шума и заметности БПЛА [48–50].

3. Параметрические исследования комплексного влияния различных параметров на акустические характеристики реальных винтомоторных СУ БПЛА на основании полуэмпирических моделей шума основных источников [31, 32, 52, 53] с целью снижения их шума и заметности в условиях эксплуатации.

4. Комплексное исследование аэроакустической и вибрационной нагруженности элементов конструкции силовой установки и планера [54–60] с целью снижения акустической эмиссии и увеличения долговечности конструкции БПЛА с винтомоторной силовой установкой.

Библиографический список

1. Barry F.W., Magliozzi B. Noise detectability prediction method for low tip speed propellers // Air Force Aero Propulsion Laboratory (AFAPL). Wright-Patterson AFB. Ohio. Technical Report AFAPL-TR-71-31, June 1971. 192 p.
2. Джанакирам Д.С., Скраггс Б.В. Характеристики обнаруживаемости и шума маломасштабных воздушных винтов беспилотных летательных аппаратов //

Аэрокосмическая техника. 1983. Т. 1. № 10. С. 108–117.

3. 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.
4. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Оценка влияния диаметра воздушного винта на акустические характеристики силовой установки легкого самолета // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17. № 1. С. 154–160.
5. 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.
6. Мошков П.А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МАИ (НИУ), 2015. — 143 с.
7. Мошков П.А. Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. №4. С. 101–106.
8. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715> (дата публикации 30.06.2012).
9. Мошков П.А. Некоторые результаты экспериментального исследования акустических характеристик силовой установки сверхлегкого самолета в статических условиях // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 265–270.
10. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Экспериментальное исследование акустических характеристик силовой установки самолета «Ан-2» в статических условиях // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58711> (дата публикации 26.06.2015).
11. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Исследование акустических характеристик легкого винтового самолета «Вильга-35А» на режимах горизонтального полета // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 2. С. 55–65.
12. 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.
13. Самохин В.Ф., Остроухов С.П., Мошков П.А. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винтокольцевым движителем в толкающей компоновке // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=44459> (дата публикации 25.11.2013).
14. Мошков П.А., Яковлев А.А. Экспериментальное исследование влияния капотирования двигателя на акустические характеристики авиационной поршне-

- вой силовой установки // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. №6. С. 271-274.
15. *Hubbard H.H.* Aeroacoustics of flight vehicles: Theory and Practice: Noise sources // NASA References Publication 1258. 1991. Vol.1. WRDC. Technical report 90-3052. 606 p.
16. *Hanson D.B.* Influence of propeller design parameters on far field harmonic noise in forward flight // AIAA Journal. 1980. Vol. 18. No. 2, pp. 1313-1319.
17. Prediction procedure for near-field and far-field propeller noise. AIR 1407. Society of Automotive Engineers. 1977. 21 p.
18. *Ianniello S., Mascio A. D., Salvatore F., Sollo A., Aversano M., Gennaretti M.* Evaluation of Noise Excess for Pushing Propeller Aircraft by CFD Aeroacoustic Calculation // 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2004. AIAA Paper. No. 2004-3006. 17 p.
19. *Soderman P.T., Clifton Horne W.* Acoustic and aerodynamic study of a Pusher-Propeller aircraft model // NASA Technical Paper. 1990. No. 3040. 68 p.
20. *Bloch P.J.W., Gentry Garl L.* Directivity and trends of noise generated by a propeller in a wake. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch, NASA Technical Paper, 1986, no. 2609, 62 p.
21. *Шатров М.Г., Яковенко А.Л., Кричевская Т.Ю.* Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие. — М.: МАДИ, 2014. — 68 с.
22. *Шатров М.Г., Яковенко А.Л.* Исследование виброакустических характеристик ДВС при изменении его конструктивных параметров // Вестник АГТУ. 2008. № 5(46). С. 98-103.
23. *Тупов В.В.* Структурный шум ДВС с воздушной системой охлаждения и методы его снижения // Безопасность в техносфере. 2012. № 6. С. 63-69.
24. *Зленко Н.А., Кедров А.В., Кишалов А.Н.* Оптимальное аэроакустическое проектирование воздушного винта // Ученые записки ЦАГИ. 2011. Т. XLII. № 6. С. 92-103.
25. *Кедров А.В., Кишалов А.Н.* К постановке задачи аэроакустического проектирования винта // Труды ЦАГИ. 1989. Вып. 2508. С. 46-54.
26. *Gur O., Rosen A.* Optimization of propeller based propulsion system // Journal of Aircraft. 2009. Vol. 46. No. 1, pp. 95-106.
27. *Gur O., Rosen A.* Optimizing electric propulsion systems for unmanned aerial vehicles // Journal of Aircraft. 2009. Vol. 46. No. 1, pp. 1340-1353.
28. *Pagano A., Frederico L., Barbarino M., Aversano M.* Multi-objective aeroacoustic optimization of an aircraft propeller // 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. No. AIAA Paper 2008-6059. Victoria. Canada. 10-12 September 2008. URL: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2008-6059> (дата обращения 31.10.2016).
29. *Pagano A., Barbarino M., Casalino D., Frederico L.* Tonal and broadband noise calculations for aeroacoustic optimization of propeller blades in a pusher configuration // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, No. AIAA Paper 2009-3138. Miami. USA. 11-13 May 2009. 18 p.
30. *Lefebvre T., Canard S., Le Tallec C., Beaumier P., David F.* ANIBAL: A new aero-acoustic optimized propeller for light aircraft applications // 27th Congress of ICAS. Nice. France. 19 — 24 September 2010. 18 p.
31. *Самохин В.Ф.* Об одном подходе к расчету дальнего акустического поля воздушного винта // Труды ЦАГИ. 1988. Вып. 2355. С. 65-75.
32. *Самохин В.Ф.* Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 5. С. 1064-1072.
33. *Липин А.В., Остроухов С.П., Серохвостов С.В., Устинов М.В., Флакман Я.Ш., Шустов А.В.* Экспериментальное исследование зависимости характеристик воздушного винта от числа Рейнольдса // Ученые записки ЦАГИ. 2007. Т. XXXVIII. №3-4. С. 102-110.
34. *Остроухов С.П.* Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 328 с.
35. *Гутин Л.Я.* О звуковом поле вращающегося винта // Журнал технической физики. 1936. Т. 6. № 5. С. 899-909.
36. *Гутин Л.Я.* О звуке вращения воздушного винта // Журнал технической физики. 1942. Т. 12. № 2-3. С.76-85.
37. *Муниин А.Г., Квитка В.Е.* Авиационная акустика. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
38. *Кажан В.Г., Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Природный фон при проведении акустических испытаний самолетов на аэродроме базирования малой авиации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №7. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (дата обращения 25.07.2015).
39. *Егоров С.В., Панкратов И.В., Самохин В.Ф., Шпаковский А.А.* О влиянии формы концевой части лопасти на шум несущего винта вертолета // Материалы XXIV научно-технической конференции по аэродинамике: Сборник тезисов докладов. — М.: ЦАГИ. 2013. С. 191.
40. *Ricouard J., Julliard E., Omais M., Regnier V., Baralon S., Parry A.B.* Installation effects on contra-rotating open rotor noise // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Stockholm. Sweden. 2010. AIAA Paper. No. 2010-3795. 8 p.
41. *Veldhuis L.L.M., Sinnige T.* The effect of pylon trailing edge blowing on the performance and noise production of a propeller // 29th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. St. Petersburg. Russia. 2014. 15 p.
42. *Sinnige T., Lynch K.P., Ragni D., Eitelberg G., Veldhuis L.L.M.* Aerodynamic and aeroacoustics effect of pylon trailing edge blowing on pusher propeller installation / / 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Dallas. USA. 2015. AIAA Paper. No. 2015-2356. 12 p.
43. *Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф.* Комплекс алгоритмов и программ для расчета шума самолетов на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 2. С. 137-157.

44. *Arntzen M., Rizzi S.A., Visser H.G., Simons D.G.* Framework for simulating aircraft flyover noise through nonstandard atmospheres // *Journal of Aircraft*. 2014. Vol. 51. No. 3, pp. 956-966.
45. *Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Медведский А.Л.* Экспериментальное изучение эффекта экранирования авиационных источников шума на маломасштабных моделях // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2016. №2 (45). С. 152-174.
46. *Ostrikov N.N., Denisov S.L.* Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: theory and experiment // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2015. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Paper No. 2015-2136. URL: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-2691> (дата обращения 31.10.2015).
47. *Ostrikov N.N., Denisov S.N.* Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Paper No. 2016-3014. URL: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2016-3014> (дата обращения 31.10.2015).
48. *Oleson R.D., Patrick H.* Small aircraft propeller noise with ducted propeller // 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 1998. AIAA Paper. No. 98-2284, pp. 464-472.
49. *Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Бобков В.Г., Козубская Т.К., Аникин В.А.* Численное моделирование аэродинамических и акустических характеристик винта в кольце // *Математическое моделирование*. 2015. Т. 27. № 10. С. 125-144.
50. *Абалакин И.В., Аникин В.А., Бахвалов П.А., Бобков В.Г., Козубская Т.К.* Численное исследование аэродинамических и акустических свойств винта в кольце // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2016. № 3. С. 130-145.
51. *Delfs J.W.* Simulation of aircraft installation noise — a key to low noise aircraft design // *Computational experiment in aeroacoustics*. CEAA 2016. Svetlogorsk, Kaliningrad region, Russia, September 21-24, 2016: Book of abstracts. — Moscow. Keldysh Institute. 2016, pp. 7-11.
52. *Мошков П.А.* Эмпирический метод прогноза шума авиационных поршневых двигателей // *Вестник СГАУ*. 2016. Т.15. №2. С. 152-161.
53. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Интегральная модель шума силовой установки легкого винтового самолета // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 4. С. 26-34.
54. *Анимица В.А., Борисов Е.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М.* Расчетные исследования виброперегрузок несущего винта, вызванных пульсацией силы тяги, на базе вихревой теории // *Труды МАИ*. 2016. № 87. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=69626> (дата обращения 10.08.2016).
55. *Денисов С.Л., Медведский А.Л.* Отклик ортотропных пластин на широкополосное акустическое воздействие при различных видах взаимной спектральной плотности действующей нагрузки // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2012. Т. 18. № 4. С. 527-543.
56. *Денисов С.Л., Медведский А.Л., Паранин Г.В.* Изучение долговечности изотропных пластин при широкополосном акустическом нагружении с различными видами функции взаимной спектральной плотности // *Ученые записки ЦАГИ*. 2014. Т. XLV. № 2. С. 118-136.
57. *Разбегаева И.А.* Расчет и оценка частотных характеристик обшивки фюзеляжа. Защита от шума // *Труды МАИ*. 2011. № 45. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25552> (дата обращения 10.08.2016).
58. *Бакланов В.С.* Анализ виброакустических процессов в турбореактивном двигателе и других агрегатах силовой установки по результатам исследований частотных характеристик системы «двигатель — крепление — планер» // *Ученые записки ЦАГИ*. 2010. Т. XLI. № 1. С. 78-85.
59. *Бакланов В.С.* Роль структурного шума в гермокабине самолета от вибрационного воздействия двигателей нового поколения // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62. № 4. С. 451-456.
60. *Бакланов В.С.* Виброакустика самолетов нового поколения с двигателями большой и сверхбольшой двухконтурности // *Математическое моделирование*. 2007. Т. 19. № 7. С. 27-38.

NOISE AND ACOUSTIC SIGNATURE REDUCTION METHODS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH ENGINE-PROPELLER POWER PLANT

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

¹ Company "Sukhoi civil aircraft",

23B, building 2, Polikarpova str., Moscow, 125286, Russia

² Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky,

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

* e-mail: moshkov89@bk.ru

** e-mail: samohin_vf@mail.ru

Abstract

In recent years, the problem of acoustic signature has become particularly actual and a topical due to the extensive use of combat aircraft systems with unmanned structures, solving decisive reconnaissance and strike tasks, for which low figures of acoustic signature ensuring is of prime importance.

The paper considers basic techniques for engine-propeller power plant noise reduction of aircraft type UAVs, including single air propellers of various structures and configuration, as well as piston engines.

Based on semi-empirical model the authors proposed equations allowing evaluate the effect of the diameter and number of blades on tonal components of the propeller noise in the condition of constant thrust, aerodynamic and geometric similarity of blade profiles, as well as the Mach number of the tip speed. Acoustic testing of Yak-18T light aircraft with two- and three-blade propellers, F30 and MAI-223M, performed at the Moscow Aviation Institute airfield, generally confirmed these equations qualitatively.

The propeller diameter decrease of a small-sized UAV with piston engine was considered as one of the options for noise and signature reduction. It was found, that the diameter decrease by 3.3% resulted in approximately 300 meters reduction of the distance to the ground checkpoint, which a small-sized UAV can approach without the possibility of being detected.

The features of acoustic pusher propellers and proposed methods for noise reduction are described. Based on the flight test the aircraft noise reduction afield technique by axial clearance increasing between the pusher propeller and the wing located in front of it was proposed. The paper demonstrates that with the considered clearance increase by an amount greater than the wing chord, the negative effect of the propeller mounting in pushing arrangement is practically eliminated.

UAVs designers can implement the engine-propeller power plant noise reduction methods, presented in the

paper. Finally, the authors outlined the ways of further studies aimed at solving the problem of developing low-noise power plants for small-sized unmanned aerial vehicles.

Keywords: acoustics signature, aircraft audibility, detectability, unmanned aerial vehicle, propeller noise, piston engine noise, engine-propeller power plant, noise reduction methods, acoustic location.

References

1. Barry F.W., Magliozzi B. Noise detectability prediction method for low tip speed propellers. *Air Force Aero Propulsion Laboratory (AFAPL)*. Wright-Patterson AFB. Ohio. Technical Report AFAPL-TR-71-31, June 1971, 192 p.
2. Dzhanakiram D.S., Skraggs B.V. *Aerokosmicheskaya tekhnika*, 1983, vol. 1, no. 10, pp. 108-117.
3. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 50-61.
4. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik SibGAU*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 154-160.
5. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 3, pp. 25-34.
6. Moshkov P.A. *Prognozirovaniye i snizheniye shuma na mestnosti legkikh vintovykh samoletov* (Prediction and reduction of environmental noise generated by light propeller aircraft). PhD thesis, Moscow, MAI, 2015, 143 p.
7. Moshkov P.A. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 101-106.
8. Samokhin V.F., Moshkov P.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 57, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=30715> (accessed 30.06.2012).
9. Moshkov P.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 6, pp. 265-270.
10. Samokhin V.F., Moshkov P.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=58711> (accessed 26.06.2015).
11. Samokhin V.F., Moshkov P.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 55-65.
12. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2016, vol. 47, no. 6, pp. 55-60.

13. Samokhin V.F., Ostroukhov S.P., Moshkov P.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 70, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=44459> (accessed 25.11.2013).
14. Moshkov P.A., Yakovlev A.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 6, pp. 271-274.
15. Hubbard H.H. *Aeroacoustics of flight vehicles: Theory and Practice: Noise sources*. NASA References Publication 1258, 1991, vol. 1, WRDC. Technical report 90-3052, 606 p.
16. Hanson D.B. Influence of propeller design parameters on far field harmonic noise in forward flight. *AIAA Journal*, 1980, vol. 18, no. 2, pp. 1313-1319.
17. *Prediction procedure for near-field and far-field propeller noise*. AIR 1407. Society of Automotive Engineers, 1977, 21 p.
18. Ianniello S., Mascio A. D., Salvatore F., Sollo A., Aversano M., Gennaretti M. Evaluation of Noise Excess for Pushing Propeller Aircraft by CFD Aeroacoustic Calculation. *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2004, AIAA Paper, no. 2004-3006, 17 p.
19. Soderman P.T., Clifton Horne W. Acoustic and aerodynamic study of a Pusher-Propeller aircraft model. *NASA Technical Paper*, 1990, no. 3040, 68 p.
20. Block P.J.W., Gentry Garl L. *Directivity and trends of noise generated by a propeller in a wake*. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch, NASA Technical Paper, 1986, no. 2609, 62 p.
21. Shatrov M.G., Yakovenko A.L., Krichevskaya T.Yu. *Shum avtomobil'nykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya* (Noise of automobile internal combustion engine), Moscow, MADI, 2014, 68 p.
22. Shatrov M.G., Yakovenko A.L. *Vestnik AGTU*, 2008, no. 5 (46), pp. 98-103.
23. Tupov V.V. *Bezopasnost' v tekhnosfere*, 2012, no. 6, pp. 63-69.
24. Zlenko N.A., Kedrov A.V., Kishalov A.N. Optimal aeroacoustic propeller design. *TsAGI Science Journal*, 2011, vol. 42, no. 6, pp. 892-844.
25. Kedrov A.V., Kishalov A.N. *Trudy TsAGI*, 1989, no. 2508, pp. 46-54.
26. Gur O., Rosen A. Optimization of propeller based propulsion system. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 1, pp. 95-106.
27. Gur O., Rosen A. Optimizing electric propulsion systems for unmanned aerial vehicles. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 1, pp. 1340-1353.
28. Pagano A., Frederico L., Barbarino M., Aversano M. Multi-objective aeroacoustic optimization of an aircraft propeller. *12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*. No. AIAA Paper 2008-6059. Victoria. Canada. 10-12 September 2008, <http://dx.doi.org/10.2514/6.2008-6059>
29. Pagano A., Barbarino M., Casalino D., Frederico L. Tonal and broadband noise calculations for aeroacoustic optimization of propeller blades in a pusher configuration. *15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, no. AIAA Paper 2009-3138, Miami, USA, 11-13 May 2009, 18 p.
30. Lefebvre T., Canard S., Le Tallec C., Beaumier P., David F. ANIBAL: A new aero-acoustic optimized propeller for light aircraft applications. *27th Congress of ICAS*. Nice, France, 19-24 September 2010, 18 p.
31. Samokhin V.F. *Trudy TsAGI*, 1988, no. 2355, pp. 65-75.
32. 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.
33. Lipin A.V., Ostroukhov S.P., Serokhvostov S.V., Ustinov M.V., Flaksman Ya.Sh., Shustov A.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2007, vol. XXXVIII, no. 3-4, pp. 102-110.
34. Ostroukhov S.P. *Aerodinamika vozdushnykh vintov i vintokol'tsevykh dvizhitelei* (Aerodynamics of propellers and impellers), Moscow, Fizmatlit, 2014, 328 p.
35. Gutin L.Ya. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1936, vol. 6, no. 5, pp. 899-909.
36. Gutin L.Ya. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1942, vol. 12, no. 2-3, pp. 76-85.
37. Munin A.G., Kvitka V.E. *Aviatsionnaya akustika* (Aviation acoustics), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 448 p.
38. Kazhan V.G., Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana "Nauka i obrazovanie"*, 2015, no. 7, available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (accessed 25.07.2015).
39. Egorov S.V., Pankratov I.V., Samokhin V.F., Shpakovskii A.A. *Materialy XXIV nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po aerodinamike. Sbornik tezisev dokladov*, Moscow, TsAGI, 2013, 191 p.
40. Ricouard J., Julliard E., Omais M., Regnier V., Baralon S., Parry A. B. Installation effects on contra-rotating open rotor noise. *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. AIAA Paper, no. 2010-3795, Stockholm, Sweden, 2010, 8 p.
41. Veldhuis L.L.M., Sinnige T. The effect of pylon trailing edge blowing on the performance and noise production of a propeller. *29th Congress of ICAS. St. Petersburg, Russia*, 2014, 15 p.
42. Sinnige T., Lynch K.P., Ragni D., Eitelberg G., Veldhuis L.L.M. Aerodynamic and aeroacoustics effect of pylon trailing edge blowing on pusher propeller installation. *21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA Paper, Dallas, USA, no. 2015-2356, 12 p.
43. 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.
44. Arntzen M., Rizzi S.A., Visser H.G., Simons D.G. Framework for simulating aircraft flyover noise through nonstandard atmospheres. *Journal of Aircraft*, 2014, vol. 51, no. 3, pp. 956-966.
45. Ostrikov N.N., Denisov S.L., Medvedskii A.L. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2016, no. 2 (45), pp. 152-174.
46. Ostrikov N., Denisov S. Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: theory and experiment. *21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - 2015, AIAA Paper*, no. 2015-2136, <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-2691>

47. Ostrikov N., Denisov S. Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - 2016. *AIAA Paper*, no. 2016-3014, <http://dx.doi.org/10.2514/6.2016-3014>
48. Oleson R.D., Patrick H. Small aircraft propeller noise with ducted propeller. 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - 1998, *AIAA Paper*, no. 98-2284, pp. 464-472.
49. Abalakin I.V., Bakhvalov P.A., Bobkov V.G., Kozubskaya T.K., Anikin V.A. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2015, vol. 27, no. 10, pp. 125-144.
50. Abalakin I.V., Anikin V.A., Bakhvalov P.A., Bobkov V.G., Kozubskaya T.K. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2016, no. 3, pp. 130-145.
51. Delfs J.W. Simulation of aircraft installation noise – a key to low noise aircraft design. *Computational experiment in aeroacoustics. CEAA 2016*. Svetlogorsk, Kaliningrad region, Russia, September 21-24, 2016. Book of abstracts. Moscow, Keldysh Institute, 2016, pp. 7-11.
52. Moshkov P.A. *Vestnik SSAU*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 152-161.
53. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 26-34.
54. Animitsa V.A., Borisov E.A., Kritskii B.S., Mirgazov R.M. *Trudy MAI*, 2016, no. 87, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=69626> (accessed 10.08.2016).
55. Denisov S.L., Medvedskii A.L. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 527-543.
56. Denisov S.L., Medvedskii A.L., Paranin G.V. Study of the durability of isotropic plates under wideband acoustic loading with different type of spatial correlation functions. *TsAGI Science Journal*, 2014, vol. 45, no. 3-4, pp. 345-365.
57. Razbegaeva I.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 45, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=25552> (accessed 10.08.2016).
58. Baklanov V.S. Vibroacoustic processes modeling in the turbojet engine and other power plant units based on frequency characteristics investigation of the “engine-mounting-airframe” system. *TsAGI Science Journal*, 2010, vol. 41, no. 1, pp. 109-118.
59. Baklanov V.S. *Akusticheskii zhurnal*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 451-456.
60. Baklanov V.S. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2007, vol. 19, no. 7, pp. 27-38.