

УДК 534.83:629.7

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВИНТОМOTORНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

П. А. Мошков

moshkov89@bk.ru

АО «Гражданские самолеты Сухого» (АО «ГСС»)

Поступила в редакцию 14.08.2018

Аннотация. Обобщены результаты исследований акустических характеристик винтомоторных силовых установок с точки зрения оценки энергетических зависимостей, необходимых при разработке эмпирических и полуэмпирических моделей шума. Экспериментальные данные получены при проведении испытаний самолетов Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890, МАИ-890У, F30 и двух беспилотных летательных аппаратов с поршневыми двигателями. Изучено влияние полетных условий на энергетические характеристики акустического поля воздушных винтов. Показано, что увеличение числа лопастей приводит к уменьшению акустического КПД винтомоторных силовых установок.

Ключевые слова: воздушный винт; шум воздушного винта; шум самолетов; шум силовых установок; аэроакустика; авиационный двигатель; акустические измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Проблему оценки и снижения шума на местности летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой (СУ), включающей в себя поршневые двигатели и воздушные винты различной конструкции и компоновки, принято рассматривать отдельно для самолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

В первом случае необходимо обеспечить конкурентный уровень акустических характеристик для сертификации и успешной многолетней эксплуатации самолета. Во втором случае необходимо обеспечить низкую степень акустической заметности БПЛА с целью обеспечения его живучести [1].

В любом случае для решения указанных задач необходимы надежные методы расчета [2–6] и снижения шума [7–9] винтомоторных силовых установок в условиях реальных компоновок как основных источников шума на местности летательных аппаратов данного типа. Для разработки методов оценки и снижения шума винтомоторных

силовых установок на местности необходим комплекс исследований спектральных, энергетических и пространственных [10] характеристик акустических полей воздушных винтов и поршневых двигателей.

В данной статье обобщены энергетические характеристики акустического поля винтомоторных силовых установок по результатам исследований шума самолетов Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890, МАИ-890У, F30 и двух беспилотных летательных аппаратов с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) [11–20]. Измерения шума легкомоторных самолетов были выполнены на аэродроме Московского авиационного института (МАИ) в статических условиях. Во время всех испытаний уровень природного фона был существенно ниже уровня полезного сигнала во всем исследуемом диапазоне частот [21]. Исследования шума малоразмерных БПЛА были выполнены на установках Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ) как при наличии набегающего потока, так и без него.

Разделение акустических полей воздушного винта и поршневого двигателя осуществлялось на основании анализа узкополосных спектров уровней звукового давления. Акустическое поле полагалось симметричным относительно оси двигателя. Также полагалось, что суммарное излучение поршневого двигателя определяется излучением на частотах, кратных частоте следования вспышек в цилиндрах двигателя.

В качестве примера на рис. 1 представлен типовой узкополосный спектр уровней звукового давления, полученный при измерениях акустических характеристик малогабаритного БПЛА в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Силовая установка БПЛА включает одноцилиндровый поршневой двигатель и двухлопастной винт неизменяемого шага. На графике цифрами с индексами «д» и «в» обозначены гармоники шума двигателя и винта соответственно. В данном примере некоторые спектральные тональные уровни в спектре являются суммой излучений на частоте следования вспышек в цилиндре двигателя и частоте следования лопастей воздушного винта.

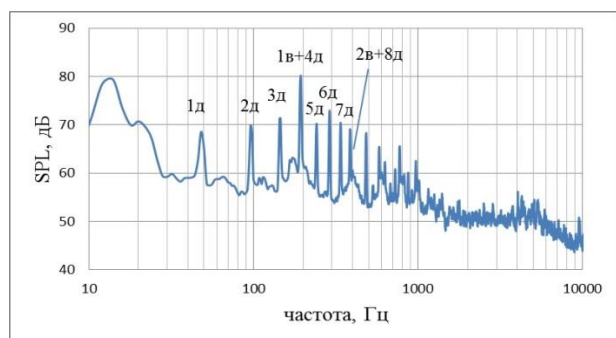


Рис. 1. Типовой узкополосный спектр акустического излучения СУ БПЛА с шириной полосы 2 Гц (частота вращения коленвала 5760 об/мин, задняя полусфера $\varphi=120^\circ$, скорость набегающего потока 30 м/с, на расстоянии 2 метра)

ШУМ ВОЗДУШНОГО ВИНТА

Известно [22], что для аэродинамических источников интенсивность излучения пропорциональна характерной скорости обтекания профиля лопасти в степени 4 для монополя (шум вытеснения) и шестой степени для диполя (шум от аэродинамической нагрузки, вихревой шум). Согласно полуэмпирической модели [2, 3] мощность акусти-

ческого излучения от аэродинамической нагрузки пропорциональна квадрату тяги винта.

В табл. 1 представлены диапазоны изменения показателей степени зависимости отдельных составляющих акустического излучения от числа Маха окружной скорости воздушного винта для СУ самолетов с тянущими винтами (Ан-2, МАИ-223М, F30) и для СУ с толкающими винтами (МАИ-890 и МАИ-890У) при испытаниях в статических условиях.

Таблица 1

Диапазоны изменения показателей степени зависимости звуковой мощности отдельных составляющих шума винта от числа Маха окружной скорости

<i>Тип СУ</i>	<i>СУ с тянущим винтом</i>	<i>СУ с толкающим винтом</i>
1-я гармоника шума винта	8,8÷10,7	6,2÷11,3
2-я гармоника шума винта	6,4÷10,4	3,6÷8,5
широкополосное излучение (1000–5000 Гц)	5÷7	4,1÷7,8

Можно видеть, что показатели степени изменяются в достаточно широких пределах. Это связано со сложностью и большим разнообразием механизмов генерации шума воздушным винтом и, как следствие, различным соотношением вклада источников при различных режимах работы СУ.

Изменение показателей степени при числе Маха окружной скорости в соотношении для мощности широкополосного излучения от 4,1 до 7,8 свидетельствует о том, что помимо вихревого следа за лопастями существенную роль в этом излучении могут играть и другие источники. Это вихревая составляющая шума впуска и выхлопа, высокочастотный структурный шум, а также шум от неустановившейся аэродинамической нагрузки на лопастях винта. Соотношение между различными источниками широкополосного высокочастотного шума (1000–5000 Гц) зависит от конструктивных особенностей и особенностей организации рабочего процесса в двигателе, от геометрических и аэродинамических характери-

стик воздушного винта, а также от режима работы СУ и ее компоновки на самолете.

Влияние числа Рейнольдса на интенсивность или мощность излучения широкополосного (вихревого) шума воздушного винта рассмотрено в работах [17, 23, 24]. Режим обтекания лопастей винта существенно влияет на энергетические характеристики вихревого шума. Для малонагруженных винтов, работающих на режиме автомодельности, т.е. при числах Рейнольдса (Re) существенно выше 10^6 характерна зависимость звуковой мощности от характерной скорости обтекания профиля лопасти в степени 5 (при $\lg Re=6,5$) [17].

Поэтому в рамках интегральной модели шума широкополосную составляющую акустического излучения воздушного винта предлагается оценивать на основе модели шума задней кромки для третьоктавных уровней звукового давления:

$$SPL_{шпр}(f) = 10 \lg \times \left[U^5 z \Phi \frac{\delta l}{R^2} \left(\frac{St}{St_{max}} \right)^4 \left(\left(\frac{St}{St_{max}} \right)^{1,5} + 0,5 \right)^{-4} \right] + K_b,$$

где z – число лопастей, $\delta = \frac{0,37c}{Re^{0,2}}$ толщина пограничного слоя (м), c – хорда лопасти винта (м), Re – число Рейнольдса, K_b – коэффициент масштабирования [25], Φ – фактор направленности, U – характерная скорость обтекания профиля лопасти воздушного винта (м/с), R – расстояние от источника до наблюдателя (м), l – длина элемента лопасти (м), f – центральная частота третьоктавной полосы частот (Гц), $St = \frac{f\delta}{u}$ – число Струхала, $St_{max} = 0,1$ [25].

В области низких чисел Рейнольдса, при которых работают малоразмерные воздушные винты БПЛА, показатель степени может принимать различные значения. При изменении значения $\lg Re$ в диапазоне 1,8 до 5 итоговая зависимость показателя степени роста скорости сначала падает от 6 до 3, сохраняется равной 3 в диапазоне $\lg Re$

$2,65 \div 3,2$, а затем растет вплоть до 8 и далее [23]. Эти данные необходимо учитывать при разработке малоразмерных винтов, в шуме которых вклад вихревой составляющей может быть соизмерим с вкладом тонального шума. Высокочастотный вихревой шум может определять слышимость винта.

На основании наземных испытаний легкомоторных самолетов была получена зависимость относительной спектральной плотности мощности гармонических составляющих шума воздушного винта (W_m) от частоты гармоники (f_m).

$$\bar{S}_m = \frac{W_m}{W_1} = c f_m^{-3}, \tag{1}$$

где W_1 – звуковая мощность первой гармоники, c – эмпирический коэффициент пропорциональности. Соотношение (1) предлагается использовать в рамках полуэмпирической модели шума [2] для оценки уровней звуковой мощности тональных составляющих после оценки уровня звуковой мощности первой гармоники шума винта как суммы излучений от нагрузки и от вытеснения.

Зависимость звуковой мощности первой гармоники шума малоразмерного винта БПЛА «Птеро-G0» ($L_{W1/e}$) от относительной поступи, определяемой выражением

$$\lambda = \frac{V}{nD},$$

где V – скорость набегающего потока, м/с, n – частота вращения, об/с, D – диаметр винта, м, представлена на рис. 2.

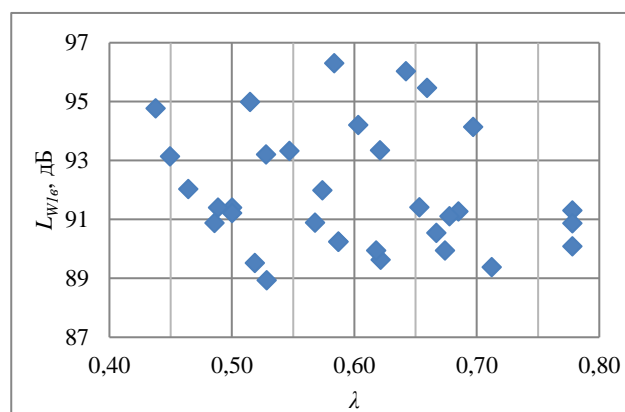


Рис. 2. Зависимость уровня звуковой мощности первой гармоники шума вращения винта БПЛА «Птеро-G0» от относительной поступи

Измерения выполнялись в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ при различных скоростях набегающего потока и различных частотах вращения винта. Можно видеть, что все рассмотренные режимы работы группируются в четыре зависимости уровней звуковой мощности первой гармоники шума винта от относительной поступи. В среднем для четырех режимов получено, что звуковая мощность первой гармоники шума малоразмерного винта пропорциональна относительной поступи в степени $-6,35$.

Представленные на рис. 2 результаты являются новыми для отечественной и зарубежной научной литературы.

Влияние полетных условий. При наличии набегающего потока показатель степени зависимости звуковой мощности первой гармоники от числа Маха характерной скорости обтекания профиля лопасти малоразмерного винта составляет 4,3, в то время как в статических условиях 7,5 [18]. Эти данные свидетельствуют о доминирующей роли шума от установившейся и неустановившейся аэродинамической нагрузки на первой гармонике шума вращения винта при его работе в статических условиях. При наличии набегающего потока роль шума от неустановившейся нагрузки существенно уменьшается и при умеренных режимах работы существенным становится шум вытеснения, о чем и свидетельствует показатель степени 4,3.

ШУМ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Зависимости параметров шума поршневых двигателей наземного применения от частоты вращения коленвала и нагрузки двигателя неоднократно приводились в литературе. Известно [26], что интенсивность акустического излучения двухтактных карбюраторных двигателей пропорциональна частоте вращения коленвала в степени 4. В работе [27] для карбюраторных бензиновых двигателей получена зависимость в степени 5 и для дизельных двигателей в степени 2–3, что согласуется с исследованиями И. И. Славина [28].

Для дизельных двигателей с объемно-пристеночным смесеобразованием звуковая

мощность структурного шума пропорциональна номинальной частоте вращения коленвала в степени 3, рабочему объему двигателя в степени 2 и среднему эффективному давлению в степени 0,5 [29].

Показатели степени зависимости звуковой мощности от частоты вращения коленвала и располагаемой мощности СУ, полученные при исследованиях, выполненных автором, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели степени зависимости мощности излучения от располагаемой мощности (N_e^x) и от частоты вращения коленвала ($n_{кв}^y$) двигателей

Показатель степени	x	y
АШ-62ИР	0,56	3,8
ROTAX-912ULS	4,6	6,5
ROTAX-582UL	5,4	6,8
Двухцилиндровый двухтактный двигатель	–	4
Saito FG-40	–	4,6

Показатели степени зависимости звуковой мощности от частоты вращения коленвала близкие к 4 свидетельствуют о доминирующей роли шума выхлопа при отсутствии глушителей. При наличии эффективных глушителей в выхлопном тракте ДВС существенным становится структурный шум и показатель степени увеличивается до 6,8.

Отметим также, что энергетические характеристики ДВС существенным образом зависят от примененных способов снижения шума. Актуальными являются направления снижения структурного шума за счет применения вибро- и звукоизолирующих капотов, балансировки коленвала, применения блоков виброизоляции в узлах креплений [30], а также применение активных и комбинированных активно-реактивных глушителей шума впуска и выхлопа.

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ЛОПАСТЕЙ НА АКУСТИЧЕСКИЙ КПД СУ

Наиболее общей характеристикой источника акустического излучения аэродинами-

ческого типа является акустический КПД ($\eta_{ак}$) – относительная мера количества механической энергии силовой установки, излучаемой в виде акустической энергии.

$$\eta_{ак} = \frac{W_{СУ}}{N_e} \times 100\%,$$

где $W_{СУ}$ – суммарная мощность акустического излучения СУ, N_e – эффективная (располагаемая) мощность СУ.

Представляет интерес оценить влияние числа лопастей на акустический КПД СУ. На величину акустического КПД винтомоторной СУ могут влиять и другие факторы, такие как наличие глушителей шума впуска и выхлопа, капотирование и тактность двигателя и др. В то же время незначительные изменения диаметра винта не должны существенным образом влиять на акустический КПД СУ, поскольку он является основным параметром при подборе винта к двигателю и существует определенная связь между диаметром винта и располагаемой мощностью СУ.

В табл. 3 представлены данные об акустическом КПД винтомоторных силовых установок самолетов Ан-2 с четырехлопастным винтом, Як-18Т с двухлопастным и с трехлопастным винтами, рассчитанным для взлетного режима работы двигателей. Представленные зависимости акустического КПД от числа лопастей являются корректными, поскольку в состав СУ рассматриваемых самолетов входят схожие по удельным характеристикам двигателя, 9-цилиндровые, звездообразные, воздушного охлаждения, без глушителей шума выхлопа.

Таблица 3

Акустический КПД СУ

Самолет	Ан-2	Як-18Т	
Двигатель	АШ-62ИР	М-14П	
Литровая мощность, кВт/л	24,62	26,06	
Удельная мощность, кВт/кг	1,31	1,24	
Число лопастей воздушного винта	4	3	2
Акустический КПД, %	0,055	0,065	0,15

Можно видеть, что увеличение числа лопастей в целом приводит к снижению акустического КПД винтомоторных силовых установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментального исследования энергетических характеристик акустического поля силовых установок, включающих в себя одиночные воздушные винты различной конструкции и компоновки и поршневые двигатели. Установлено, что увеличение числа лопастей воздушного винта приводит к снижению акустического КПД винтомоторных СУ. Представленные энергетические характеристики акустического поля малоразмерных воздушных винтов, работающих при низких числах Рейнольдса, могут использоваться при разработке полуэмпирической прогнозистической модели, а также для верификации численных методов расчета [31–35].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошков П. А., Самохин В. Ф., Яковлев А. А. Выбор критерия слышимости беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 3–9. [П. А. Moshkov, V. F. Samokhin and A. A. Yakovlev, "Engine-propeller-driven air vehicle audibility criterion selection", (in Russian), in *Aviacionnaya tekhnika*, vol. 61, no. 2, pp. 3-9, 2018.]
2. Самохин В. Ф. Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 5. С. 1064–1072. [V. F. Samokhin, "Semiempirical method for estimating the noise of a propeller", (in Russian), in *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, vol. 85, no. 5, pp. 1064-1072, 2012.]
3. Мошков П. А., Самохин В. Ф. Интегральная модель шума винтомоторной силовой установки // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 2. С. 353–360. [П. А. Moshkov and V. F. Samokhin, "Integral model of noise of an engine-propeller power plant", (in Russian), in *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, vol. 91, no. 2, pp. 353-360, 2018.]
4. 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. [V. G. Dmitriev and V. F. Samokhin, "Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise", (in Russian), in *Uchenye Zapiski TsAGI*, vol. 45. no. 3-4, pp. 137-157, 2014.]
5. Мошков П. А. Эмпирический метод прогноза шума авиационных поршневых двигателей // Вестник СГАУ. 2016. Т. 15. № 2. С. 152–161. [П. А. Moshkov, "The empirical method of prediction of aircraft piston engines noise", (in Russian), in *Vestnik SGAU*, vol. 15, no. 2, pp. 152-161, 2016.]
6. Мошков П. А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ, 2015. 23 с. [П. А. Moshkov, Pre-

diction and reduction of environmental noise generated by light propeller aircraft. PhD thesis, (in Russian). Moscow: MAI, 23 p. 2015.]

7. **Мошков П. А., Самохин В. Ф.** Методы снижения шума и заметности // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 38–48. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin, "Noise and acoustic signature reduction methods for unmanned aerial vehicles with engine-propeller power plant", (in Russian), in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 24, no. 1, pp. 38-48, 2017.]

8. **Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A.** Engine-propeller power plant aircraft community noise reduction key methods // J. Eng. Applied Sci. 2017. vol. 12. no. 9. pp. 8601-8606.

9. **Moshkov P. A., Samokhin V. F., Yakovlev A. A.** Engine-propeller power plant aircraft community noise reduction key methods // AIP Conference Proceedings. 2018. vol. 1952. no. 020059. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5032021>

10. **Мошков П. А.** О направленности акустического излучения винтомоторных силовых установок // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21. № 1 (75). С. 118–127. [P. A. Moshkov, "About the direction of acoustic radiation of propeller power plant," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 1 (75), pp. 118-127, 2017.]

11. **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. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin, "Assessing the impact of the propeller diameter to the acoustic characteristics of of the power plant light aircraft", (in Russian), in *Vestnik SibGAU*, vol. 17, no. 1, pp. 154-160, 2016.]

12. **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. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin, "Assessing the impact of the number of blades and the diameter on the propeller noise", (in Russian), in *Vestnik Samarskogo universiteta. Aero-kosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, vol. 15, no. 3, pp. 25-34, 2016.]

13. **Самохин В. Ф., Мошков П. А.** Экспериментальное исследование акустических характеристик силовой установки самолета «Ан-2» в статических условиях // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin_moshkov_rus.pdf (дата публикации 26.06.2015). [V. F. Samokhin and P. A. Moshkov (2015, jun. 26) "Experimental study of the acoustic characteristics of the power plant of the aircraft "An-2" in static conditions," (in Russian), in *Trudy MAI*, no. 82, 2015. Available: http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin_moshkov_rus.pdf]

14. **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. [P. A. Moshkov, "Some results of the experimental study of acoustic characteristics by the power plant of ultralight aircraft in static conditions", (in Russian), in *Nauchno-tekhnicheskij Vestnik Povolzh'ya*, no. 6, pp. 265-270, 2014.]

15. **Мошков П. А.** Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 101–106.

[P. A. Moshkov, "Classification of sources of noise light propeller aircraft on the ground," (in Russian), in *Nauchno-tekhnicheskij Vestnik Povolzh'ya*, no. 4, pp. 101-106, 2015.]

16. **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. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin, "Experimental determination of the role of the piston engine in the total noise power plant of the light propeller aircraft", (in Russian), in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 23, no. 2, pp. 50-61, 2016.]

17. **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. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin, "The study of acoustic characteristics by the light propeller aircraft "Wilga 35A" to level flight modes", (in Russian), in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 21, no. 2, pp. 55-65, 2014.]

18. **Исследование** акустических характеристик беспилотного летательного аппарата «Птеро-G0» в заглушенной камере АК-2 // И. В. Беляев и др. / Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 52–62. [I. V. Belyev et. al., "Studying the "Ptero-G0" unmanned flying vehicles acoustic characteristics in AK-2 anechoic chamber." (in Russian), in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 24, no. 4, pp. 52-62, 2017.]

19. **Самохин В. Ф., Мошков П. А.** Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://mai.ru/upload/iblock/8dd/akusticheskie-kharakteristiki-legkogo-vintovogo-samoleta-s-dvigatelem-vnutrennegosgoraniya.pdf> (дата публикации 30.06.2012). [V. F. Samokhin and P. A. Moshkov. (2012, jun. 30) "Acoustic characteristics of a light propeller aircraft with internal combustion engine," (in Russian), in *Trudy MAI*, no. 57, 2012. Available: <http://mai.ru/upload/iblock/8dd/akusticheskie-kharakteristiki-legkogo-vintovogo-samoleta-s-dvigatelem-vnutrennegosgoraniya.pdf>]

20. **Самохин В. Ф., Остроухов С. П., Мошков П. А.** Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым двигателем в толкающей компоновке // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <http://mai.ru/upload/iblock/81d/81d77168791775d9fa57060f4d4612d5.pdf> (дата публикации 25.11.2013). [V. F. Samokhin, S. P. Ostroukhov and P. A. Moshkov (2013, Nov. 25). "Experimental study of noise sources unmanned aerial vehicle with ducted propeller in pushing arrangement", (in Russian), in *Trudy MAI*, no. 70. Available: <http://mai.ru/upload/iblock/81d/81d77168791775d9fa57060f4d4612d5.pdf>]

21. **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. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (дата обращения 25.07.2015). [V. G. Kazhan, P. A. Moshkov and V. F. Samokhin (2015, jul. 25) "Ambient background noise during acoustic testing of aircraft at the airfield of small aircraft based." (in Russian), in *Nauka i obrazovanie. MGТУ im. N. E. Bauman*, no. 7, 2015. Available: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html>.]

22. **Смирнов С. Г., Панкова Е. О.** Экспериментальный метод определения механизма генерации аэродинамического шума // Известия вузов. Машиностроение. 2016. № 11 (680). С. 50–56. [S. G. Smirnov and E. O. Pankova. "An experimental method of determining the mechanism of aerodynamic noise generation", (in Russian), in *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, no. 11 (680), pp. 50-56, 2016.]

23. **Баженова Л. А., Семенов А. Г.** О влиянии числа Рейнольдса на интенсивность вихревого звука при обтекании цилиндрического профиля // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 5. С. 586–595. [L. A. Bazhenova and A. G. Semenov, "On the influence of the Reynolds number on the intensity of vortex sound flowing around a cylindrical profile", (in Russian), in *Akusticheskij zhurnal*, vol. 59, no. 5, pp. 539-547, 2013.]

24. **Баженова Л. А.** Влияние внешних воздействий на характеристики вихревого звука // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 4. С. 412–418. [L. A. Bazhenova, "Effect of external action on the characteristics of vortex sound", (in Russian), in *Akusticheskij zhurnal*, vol. 58, no. 4, pp. 375-380, 2012.]

25. **Hubbard H.H., Shepard K.P.** Wind Turbine Acoustics. *NASA Technical Paper 3057*. DOE/NASA/20320-77. 1990. 50 p.

26. **Двухтактные** карбюраторные двигатели внутреннего сгорания. / В. М. Кондрашов и др. М.: Машиностроение, 1990. 272 с. [V. M. Kondrashov, et. al. *Two-stroke carburetor internal combustion engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1990.]

27. **Хекл М., Мюллер Х.А.** Справочник по технической акустике. Л.: Судостроение, 1980. 440 с. [M. Heckl and H. A. Muller, *Handbook of Technical Acoustics*, (in Russian). Leningrad: Sudostroenie, 1980.]

28. **Славин И. И.** Производственный шум и борьба с ним. М.: Профиздат, 1955. 336 с. [I. I. Slavin, *Industrial noise and control*, (in Russian). Moscow: Profizdat, 1955.]

29. **Шатров М. Г., Яковенко А. Л., Кричевская Т. Ю.** Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие. М.: МАДИ, 2014. 68 с. [M. G. Shatrov, A. L. Yakovenko and T. Yu. Krichevskaya, *Noise of automobile internal combustion engines*, (in Russian). Moscow: MADI, 2014.]

30. **Бакланов В. С.** Роль структурного шума в гермокабине самолета от вибрационного воздействия двигателей нового поколения // Акустический журнал. 2012. Т. 62. № 4. С. 451–456. [V. S. Baklanov, "Role of structural noise in aircraft pressure cockpit from vibration action of new-generation engines", (in Russian), in *Akusticheskij zhurnal*, vol. 62, no. 4, pp. 456-461, 2016.]

31. **Garipova L. I. et al.** Aerodynamic and acoustic analysis of helicopter main rotor blade tips in hover // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2016. vol. 26, no 7, pp. 2101-2118.

32. **Stepanov R. et al.** Experimental and numerical study of rotor aeroacoustics // *International Journal of Aeroacoustics*. 2017. vol. 16, no. 6. pp. 460-475.

33. **Копьев В. Ф., Титарев В. А., Беляев И. В.** Разработка методологии расчета шума винтов с использованием суперкомпьютеров // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 2. С. 78–106. [V. F. Kopiev, V. A. Titarev and I. V. Belyaev, "Development of a methodology for propeller noise calculation on high-performance computer", (in Russian), in *Uchenye zapiski TsAGI*, vol. 45, no. 3-4, pp. 293-327, 2014.]

34. **Abalakin I.V. et al.** Numerical investigation of the aerodynamic and acoustical properties of a shrouded rotor // *Fluid Dynamics*. 2016. vol. 51. no. 3. pp. 419-433.

35. **Yang L. et al.** A numerical study of the effects of design parameters on the acoustics noise of a high efficiency propeller // *Acoustical physics*. 2017. vol. 63. no. 6. pp. 699-710.

ОБ АВТОРЕ

МОШКОВ Петр Александрович, инженер-конструктор 1 кат., дипл. инженер (МАИ, 2012), канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (МАИ, 2015). Иссл. в обл. аэроакустики.

METADATA

Title: The energy characteristics of the acoustic field propeller-engine power plant.

Author: P. A. Moshkov

Affiliation:

Joint Stock Company «Sukhoi Civil Aircraft» (JSC «SCA»), Russia.

Email: moshkov89@bk.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 87-93, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Summarizes the research results of the propeller propulsion acoustic characteristics from the point of view of evaluating the energy dependency required for the development of empirical and semiempirical noise models. Experimental data were obtained during the tests of the An-2, Yak-18T, MAI-223M, MAI-890, MAI-890U, F30 aircraft and two unmanned aerial vehicles with piston engines. The influence of flight conditions on the energy characteristics of the acoustic field of propellers is studied. It is shown that the increase in the number of blades leads to a decrease in the acoustic efficiency of the propeller-engine power plants.

Key words: propeller; propeller noise; aircrafts noise; power plant noise; aeroacoustics; aviation engine; acoustic measurements.

About author:

MOSHKOV, Petr Aleksandrovich, design engineer of the first category, Dipl. engineer (MAI, 2012), Cand of Tech. Sci. (MAI, 2015).