

ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 534.83:629.735.33

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ШУМА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕГКОГО ВИНТОВОГО САМОЛЕТА

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

Предложена полуэмпирическая модель для оценки уровней шума, создаваемого авиационными поршневыми силовыми установками в дальнем звуковом поле, учитывающая основные источники шума. Акустическое поле рассматривается как суперпозиция полей, формируемых излучениями от воздушного винта и поршневого двигателя. Для расчетной оценки уровней тонального шума воздушного винта предлагается использовать полуэмпирический метод, разработанный авторами ранее. Для определения уровней вихревого шума винта, предположительно являющегося доминирующим в широкополосном шуме тянущих воздушных винтов, предлагается использовать одну из аналитических моделей шума задней кромки. Для расчета акустических характеристик поршневого двигателя предлагается эмпирическая модель шума. Показано хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных по шуму силовых установок с тянущими воздушными винтами. Экспериментальные данные о шуме силовых установок были получены при проведении акустических испытаний легкомоторных самолетов типа Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М и F30 в статических условиях на авиабазе Московского авиационного института. Сформулированы направления дальнейших исследований для совершенствования данной методики и расширения области ее применения.

Ключевые слова: воздушный винт, шум воздушного винта, шум поршневого двигателя, шум силовой установки, аэроакустика, шум самолета, шум беспилотного летательного аппарата.

Введение

Широкое развитие малой и беспилотной авиации и наличие требований к допустимым уровням шума, создаваемого воздушными судами, делают актуальной проблему прогнозирования шума на местности перспективных летательных аппаратов

(ЛА) с винтомоторными силовыми установками (СУ). Основным источником шума на местности таких ЛА является силовая установка, в состав которой входят одиночные воздушные винты различной конструкции и компоновки и поршневые двигатели. В зависимости от конструктивных особен-

ностей, а также от режима работы роль различных источников в шуме винтомоторной силовой установки будет различной [1, 2].

В современной научной литературе, посвященной исследованиям шума легких винтовых самолетов на местности (ЛВС), в качестве источника шума обычно рассматривается изолированный воздушный винт, работающий в невозмущенной среде. При этом не реализуется комплексный подход к шуму силовой установки самолета в целом как к суперпозиции акустических полей, формируемых излучениями воздушного винта и поршневого двигателя. Существуют аналитические методы расчета шума воздушных винтов [3—14] и различные алгоритмы и программы для расчета шума на местности лёгких ЛА, у которых доминирует излучение от воздушного винта [15].

В современной литературе проблеме шума поршневых двигателей наземного применения уделяется значительное внимание, и в частности проблемам шума системы газообмена [16—19] и структурного шума двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [20, 21]. В меньшей степени изучены характеристики направленности излучения таких двигателей. Вместе с тем требования, предъявляемые к авиационным поршневым двигателям, существенным образом влияют на их рабочие характеристики и, как следствие, на акустические. Ранее авторами был разработан метод расчета шума авиационных поршневых двигателей [22].

Данная работа объединяет и развивает разработанные авторами методы расчета отдельно шума воздушного винта и поршневого двигателя для решения задачи прогнозирования характеристик общего акустического поля силовых установок легких самолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Источники шума винтомоторных силовых установок

Акустическое излучение воздушного винта является сложным по своей структуре, а причины, вызывающие генерацию акустического излучения, весьма разнообразны. Помимо того, что лопасти винта оказывают силовое воздействие на окружающую среду и это приводит к излучению гармонической составляющей шума вращения, с лопастей винта по всей их длине происходит срыв потока, в результате чего за лопастями образуется сплошная вихревая пелена, которая служит одним из источников широкополосного (вихревого) шума. Кроме того, лопасти винта при его вращении могут периодически проходить вблизи каких-либо элементов конструкции самолета или же попадать в турбулен-

тный след за этими элементами. При этом генерируется излучение в виде периодической последовательности импульсов давления, которой соответствует гармонический спектр.

Авиационный поршневой двигатель в процессе работы генерирует шум, который с учетом различия в механизмах образования и распространения разделяют на аэродинамический и структурный [1].

Шум ДВС обусловлен рядом факторов, важнейшими из которых являются:

- аэродинамические процессы, сопровождающие сгорание топливовоздушной смеси в цилиндрах и взаимодействие воздушного и газового потоков в системах впуска и выхлопа двигателя;
- процессы механического взаимодействия движущихся элементов конструкции.

Этот шум распространяется в окружающую среду через системы впуска и выхлопа (газообмена) и через корпус двигателя. Структурный шум образуется в основном при механических взаимодействиях элементов конструкции, а также при сгорании топливовоздушной смеси и излучается через наружные поверхности двигателя.

Типовой спектр излучения винтомоторной СУ (рис. 1) содержит: тональные составляющие шума, к которым относятся гармоники шума вращения винта на частотах, кратных частоте следования лопастей ($f_{1в}, f_{2в}, f_{3в}, f_{4в}, f_{5в}, f_{6в}$), и гармоники шума двигателя на частотах, кратных частоте следования вспышек в цилиндрах ($f_{1ц}, f_{2ц}, f_{3ц}, f_{1д}$), и широкополосные составляющие излучения, источниками которых являются воздушный винт (шум задней кромки, шум от нестационарной составляющей нагрузки) и двигатель (вихревая составляющая шума впуска и выхлопа, структурный шум).

Область применения расчетной модели

Предлагаемая расчетная модель может использоваться при расчете шума винтомоторных силовых установок, в состав которых входят малонагруженные тянущие одиночные воздушные винты различной конструкции, работающие на режиме автономности при числах Рейнольдса свыше 10^6 , а также поршневые двигатели с внешним смесеобразованием.

Схема определения уровня шума винтомоторной силовой установки

Акустическое поле винтомоторной СУ рассматривается как суперпозиция полей, формируемых излучением от воздушного винта и от поршневого двигателя. При этом акустическое поле силовой

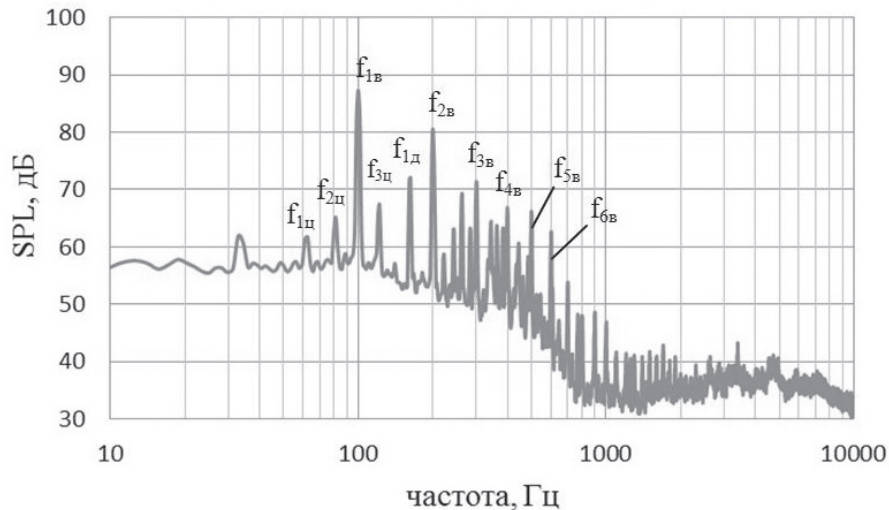


Рис. 1. Узкополосный спектр уровней звукового давления в диапазоне частот 10—10000Гц с шириной полосы 1,56 Гц, измеренный при работе СУ самолета МАИ-223М в статических условиях (частота вращения коленвала $n_{кв} = 4860$ об/мин, направление измерения $\varphi = 105^\circ$ — задняя полусфера, на расстоянии 30 м) [1]

установки полагается осесимметричным относительно оси воздушного винта (или коленвала).

Оценка уровней отдельных спектральных составляющих и суммарных уровней шума силовой установки осуществляется как энергетическая сумма уровней шума от винта L_v и от двигателя L_d :

$$L_{СУ} = 10 \lg(10^{0,1L_v} + 10^{0,1L_d}), \quad (1)$$

где $L_{СУ}$ — общий уровень шума СУ.

Уровень звукового давления источника шума аэродинамического типа в дальнем звуковом поле может быть оценен при известной мощности акустического излучения W по формуле

$$L_\varphi = 10 \lg W + \Delta - 20 \lg R + 10 \lg \Phi, \quad (2)$$

где L_φ — уровень звукового давления, дБ;

R — расстояние от источника до точки наблюдения, м;

$10 \lg \Phi$ — фактор направленности;

$\Delta = 10 \lg(1/(W_0 4\pi)) = 109$ дБ — при излучении в сферу или 112 дБ — при излучении в полусферу;

W_0 — пороговое значение акустической мощности, 10^{-12} Вт.

Фактор направленности ($10 \lg \Phi$) в выражении (2) определяется как разность между уровнями звуковых давлений исследуемого источника в некоторой точке звукового поля и фиктивного ненаправленного источника той же мощности. В качестве примера на рис. 2 представлены факторы направленности суммарного излучения винтомоторных

силовых установок и фактор направленности 1-й гармоники шума вращения винта для СУ с тянущими воздушными винтами, полученные по результатам измерений акустических характеристик самолетов типа Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М и F30 в статических условиях на аэродроме Московского авиационного института [23]. На рис. 3 представлены факторы направленности суммарного тонального излучения типовых авиационных поршневых двигателей, характерных для легкомоторной авиации.

Заметим, что максимум характеристики направленности суммарного излучения в задней полусфере в направлении 105° определяется излучением воздушного винта. В передней полусфере в направлении 0° доминирует излучение от поршневого двигателя.

Для оценки уровней спектральных составляющих в первом приближении можно использовать фактор направленности для суммарного излучения. Для более точного расчета необходимо использовать факторы направленности отдельных составляющих излучения воздушного винта и фактор направленности излучения поршневого двигателя.

Фактор направленности шума задней кромки можно определить в соответствии с выражением [24]

$$\Phi = \frac{\sin^2(\varphi/2)}{\left[(1 + M_{отн} \cos \varphi)(1 + (M_{отн} - M_c) \cos \varphi) \right]}, \quad (3)$$

где $M_{отн}$ — число Маха относительной скорости потока в концевом сечении лопасти винта; M_c — конвективное число Маха; φ — направление излучения.

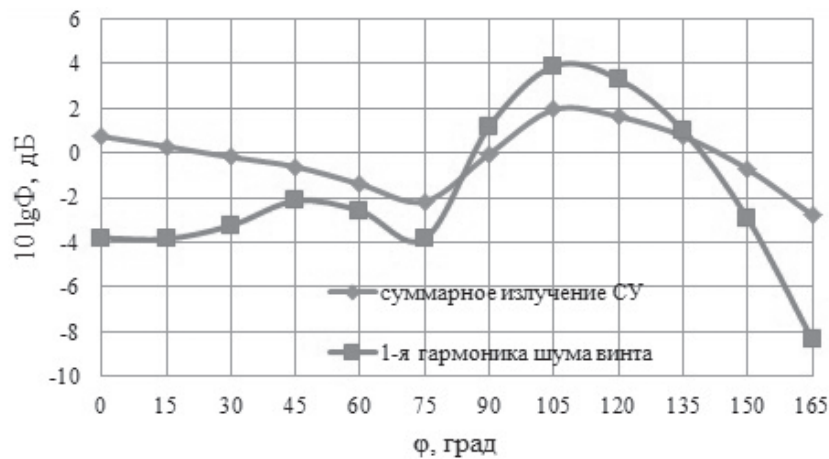


Рис. 2. Факторы направленности ($10 \lg \Phi$) суммарного излучения и 1-й гармоники шума вращения винта для СУ самолетов с тянущими винтами по измерениям акустических характеристик самолетов Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М и F30 в статических условиях

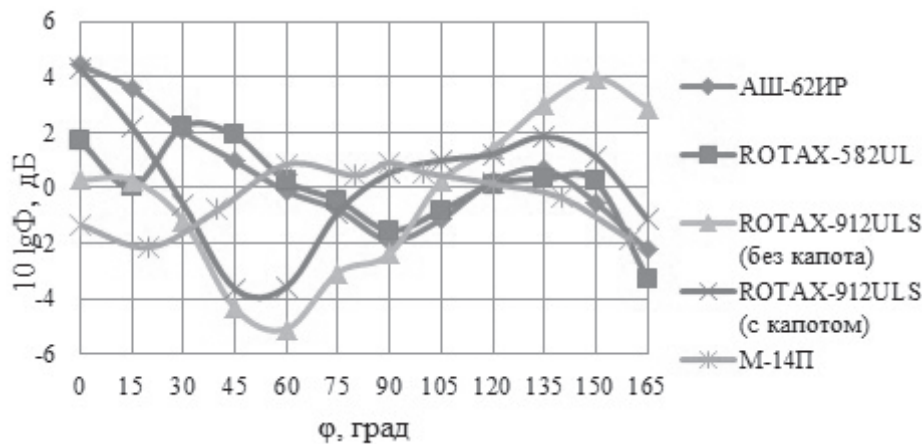


Рис. 3. Зависимость фактора направленности ($10 \lg \Phi$) суммарного гармонического излучения авиационных поршневого двигателя (АШ-62ИР, М-14П, ROTAX-582UL, ROTAX-912ULS с капотом и без) от направления излучения

Согласно полуэмпирической модели шума воздушного винта [10, 11] составляющие шума винта от аэродинамической нагрузки W_p и от вытеснения W_{un} можно рассчитать, используя выражения (4) и (5) для звуковой мощности данных источников.

Для шума от аэродинамической нагрузки

$$W_p = c_1 \frac{\rho a^3}{c_0^3} \left[\alpha^2 + \frac{\beta}{(2\pi \bar{r})^2} \right] \frac{M_{окр}^2}{z^3 b_3} n^6 d^8. \quad (4)$$

Для шума вытеснения

$$W_{un} = c_2 \frac{\rho a^3}{c_0^3} \left(1 + \frac{M_{п}^2}{M_{окр}^2} \right) \times \left(1 - \frac{\sin(2\pi a M_{окр} z^{-1})}{2\pi a M_{окр} z^{-1}} \right) \frac{1}{b_3} n^4 d^6 \bar{z} a^{-2} \bar{s}^{-2}, \quad (5)$$

где $M_{окр}$ — число Маха окружной скорости воздушного винта; $M_{п}$ — число Маха полета; α — коэффициент тяги; β — коэффициент мощности; c_1, c_2 — эмпирические коэффициенты пропорциональности; d — диаметр винта, м; a — максимальная толщина аэродинамического профиля лопасти на эффективном радиусе, м; \bar{a} — относительная толщина профиля лопасти; \bar{s} — коэффициент развернутой площади лопасти; \bar{r} — относительный радиус винта; c_0 — скорость звука, м/с; z — число лопастей; b_3 — хорда лопасти в эффективном сечении, м; ρ — плотность воздуха, кг/м³; n — частота вращения воздушного винта, об/с.

В результате многочисленных экспериментальных исследований [23, 25, 26] акустических характеристик легких самолетов в статических условиях авторами была установлена зависимость относительной спектральной плотности мощности \bar{S}_m гармонических составляющих шума малонагружен-

ного воздушного винта W_m от частоты гармоники f_m :

$$\overline{S}_m = W_m/W_1 = c_3 f_m^{-3}, \quad (6)$$

где c_3 — эмпирический коэффициент пропорциональности.

Поэтому в рамках данной методики предлагается выполнять оценку уровня звуковой мощности первой гармоники шума вращения винта как суммы составляющих шума от аэродинамической нагрузки (4) и от вытеснения (5), а уровни звуковой мощности остальных гармоник шума в спектре определять в соответствии с (6).

Отметим, что для расчета шума тянущего винта достаточно учитывать первые 10 гармоник шума вращения для статических условий и 5–6 гармоник для полетных условий. Представляет интерес в дальнейшем проверить соответствие соотношения (6), полученного по результатам измерений в статических условиях, для оценки шума винта в полетных условиях.

Вихревую составляющую шума винта предлагается оценивать с помощью соотношения для третьоктавных уровней $SPL_{шир}(f)$ [24, 27, 28] спектральных составляющих шума задней кромки, предположительно являющегося доминирующим в широкополосном шуме тянущих воздушных винтов:

$$SPL_{шир}(f) = K_b + 10 \lg \left(u_{окр}^5 z \Phi \frac{\delta l}{R^2} \left(\frac{St}{St_{max}} \right)^4 \left(\left(\frac{St}{St_{max}} \right)^{1,5} + 0,5 \right)^4 \right), \quad (7)$$

где δ — толщина пограничного слоя, м; $K_b = 0$ — коэффициент масштабирования [24]; Φ — фактор направленности; $u_{окр}$ — окружная скорость воздушного винта, м/с; l — длина элемента лопасти, м;

$St = \frac{f \delta}{u}$ — число Струхала, $St_{max} = 0,1$ [24].

Для расчета третьоктавных спектров уровней звуковой мощности $L_W(f)$ типовых авиационных поршневых двигателей удобно использовать эмпирическую модель, разработанную авторами ранее [22]:

$$L_W(f) = A_i + 10 \lg \left(\frac{N_e n_n (1 + N_e / V_H)}{\left(\frac{f}{f_1} + \frac{f_1}{f} \right)} \right) + B_j \lg \left(\frac{n_{кв}}{n_n} \right), \quad (8)$$

где n_n — номинальная частота вращения коленвала (на взлетном режиме работы), об/мин; f — центральная частота третьоктавной полосы, Гц; N_e — номинальная эффективная мощность, кВт; $n_{кв}$ — частота вращения коленвала на заданном режиме, об/мин; f_1 — центральная частота третьоктавной полосы, соответствующая частоте излучения основного тона двигателя, Гц; A_i и B_j — эмпирические коэффициенты, которые зависят от типа двигателя; V_H — рабочий объем двигателя, л.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

В качестве примера на рис. 4 представлены рассчитанные и измеренные спектры уровней звуковой мощности силовой установки самолета Ан-2, а

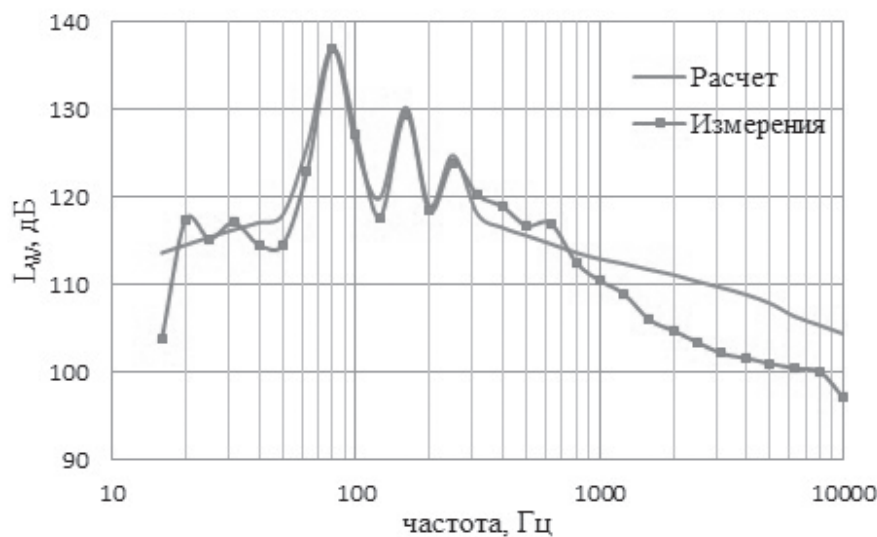


Рис. 4. Сравнение рассчитанных и измеренных третьоктавных спектров уровней звуковой мощности СУ самолета Ан-2 ($n_{кв} = 1896$ об/мин)

также рассчитанные и измеренные характеристики направленности суммарного излучения СУ самолета Ан-2 в статических условиях (рис. 5).

В заключение можно сформулировать основные направления исследований для развития предлага-

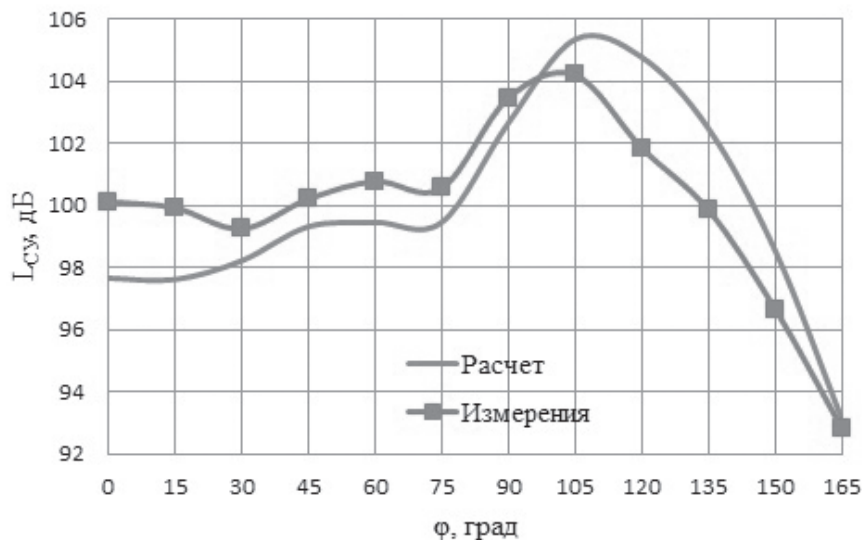


Рис. 5. Сравнение рассчитанных и измеренных характеристик направленности суммарного излучения СУ самолета Ан-2 ($n_{\text{кв}} = 1896$ об/мин, на расстоянии 30 м)

В целом получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных по энергетическим и интегральным характеристикам акустического поля винтомоторной силовой установки самолета Ан-2.

Коэффициент детерминации R^2 , который является показателем качества предложенной расчетной модели, для двух представленных примеров расчета — спектра уровней звуковой мощности СУ и характеристики направленности суммарного излучения СУ — составляет 0,9 и 0,81 соответственно. Полученные значения $R^2 > 0,8$ свидетельствуют о хорошем качестве предлагаемой модели при решении задачи прогнозирования акустических характеристик винтомоторных силовых установок в дальнем звуковом поле.

Выводы

Предложена интегральная модель для прогнозирования акустических характеристик (мощность, направленность и спектр акустического излучения) авиационных поршневых силовых установок с тянущими воздушными винтами, учитывающая основные источники шума. Основными элементами предлагаемой модели являются: полуэмпирический метод прогнозирования шума воздушного винта и эмпирическая модель шума авиационных поршневых двигателей. Показано хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных по шуму винтомоторных СУ в статических условиях.

емой расчетной модели для прогнозирования шума винтомоторных силовых установок.

1. Расширение экспериментальной базы данных по зависимости интенсивности тональных и широкополосных составляющих шума поршневого двигателя от частоты, числа цилиндров и способа организации выхлопа (числа цилиндров, объединенных в один выпускной коллектор). Наличие такой базы данных позволит повысить точность описания в расчетной модели спектра шума авиационного поршневого двигателя.

2. Разработка аналитической модели шума малоразмерных воздушных винтов для БПЛА, работающих при низких числах Рейнольдса ($Re < 10^6$).

3. Исследование влияния расположения винта в толкающей компоновке на интенсивность тонального шума винта [29].

4. Исследование влияния полетных условий на акустические характеристики воздушного винта при оценке уровней шума самолетов и БПЛА на режимах взлета и крейсерского полета.

5. Исследование влияния типа и режима работы силовой установки на характеристики направленности шума воздушного винта и поршневого двигателя.

Библиографический список

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

2. *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.
3. *Гутин Л.Я.* О звуке вращения воздушного винта // Журнал технической физики. 1942. Т. 12. № 2-3. С.76-85.
4. *Непомнящий Е.Я.* Исследование и расчет звука воздушного винта // Труды ЦИАМ. 1941. Вып. 39. С. 71-78.
5. *Мунин А.Г., Квитка В.Е.* Авиационная акустика. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
6. *Hanson D.B.* Compressible helicoidal surface theory for propeller aerodynamics and noise // AIAA Journal. 1983. Vol. 21. No. 6, pp. 881-889.
7. *Ганабов В.И., Мунин А.Г.* О расчете шума вращения одиночного винта с лопастями произвольной формы // Ученые записки ЦАГИ. 1989. Т. XX. № 5. С. 43-52.
8. *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.
9. *Мошков П.А., Яковлев А.А.* К вопросу численного моделирования шума воздушного винта // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. №6. С. 275-277.
10. *Самохин В.Ф.* Об одном подходе к расчету дальнего акустического поля воздушного винта // Труды ЦАГИ. 1988. Вып. 2355. С. 65-75.
11. *Самохин В.Ф.* Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта. // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 5. С. 1064-1072.
12. *Самохин В.Ф.* Энергетический метод расчета дальнего акустического поля несущего винта вертолета // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 3. С. 554-564.
13. *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.
14. *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.
15. *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.
16. *Малкин И.В.* Разработка технических средств снижения шумовых излучений системы газообмена двигателя легкового автомобиля: дис. ... канд. техн. наук. — М.: ГНЦ РФ «НАМИ», 2014. — 245 с.
17. *Вахитов Ю.Р., Загайко С.А.* Приближенный метод расчета шума выпуска ДВС // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. №1 (9). С. 11-14.
18. *Галевко В.В., Надарейшвили Г.Г., Юдин С.И.* Совершенствование методики расчетно-экспериментального определения акустических характеристик элементов системы выпуска // Вектор науки ТГУ. 2013. №3 (25). С. 124-127.
19. *Davis P.O.A.L., Holland K.R.* IC engine intake and exhaust noise assessment // Journal Sound and Vibration. 1999. No. 223 (3), pp. 425-444.
20. *Яковенко А.Л.* Разработка методики и инструментальных средств для прогнозирования структурного шума двигателя внутреннего сгорания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МАДИ (ГТУ), 2009. — 24 с.
21. *Тупов В.В.* Структурный шум ДВС с воздушной системой охлаждения и методы его снижения // Безопасность в техносфере. 2012. №6. С. 63-69.
22. *Мошков П.А.* Эмпирический метод прогноза шума авиационных поршневых двигателей // Вестник СГАУ. 2016. Т.15. №2. С. 152-161.
23. *Мошков П.А.* Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: дис. ... канд. техн. наук. — М.: МАИ (НИУ), 2015. — 143 с.
24. *Hubbard H.H., Shepard K.P.* Wind Turbine Acoustics/ / NASA Technical Paper. 1990 No. 3057 DOE/NASA/20320-77. 50 p.
25. *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).
26. *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.
27. *Brooks T.F., Pope D.S., Marcolini M.A.* Airfoil self-noise and prediction // NASA References Publication. 1989. No. 1218.142 p.
28. *Leslie A., Wong K.C., Auld D.* Broadband noise reduction on a mini-UAV propeller // 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Vancouver. Canada. AIAA. 2008, pp. 2008-3069.
29. *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.

PROPELLER-DRIVEN LIGHT AIRCRAFT POWER PLANT NOISE INTEGRAL MODEL

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

The extensive development of small and unmanned aircraft together with existed requirements to permissible levels of noise generated by aircraft, make the noise prediction problem afield topical for prospective aircraft with engine-propeller power plant. The main source of noise afield created by aircraft of such kind is a power plant, consisting of single propellers of various design and configuration, and piston engines.

This work integrates and develops the authors' previously developed methods of computing separate propeller noise and the piston engine noise for solving the problem of forecasting the characteristics of light aircraft and unmanned aerial vehicles power plants' total acoustic field.

The authors suggest a semi empirical model for noise levels, generated by aircraft piston engines in the far field, evaluation with allowance for main noise sources. The acoustic field is considered as a superposition of fields, formed by propeller and piston engine noise radiation. For propeller audio frequency levels estimated evaluation implementation of semi empirical method developed earlier by the authors is recommended. To determine propeller's vortex noise levels, presumably dominant in the broadband noise of tractor propellers, we propose to use one of analytical models of the trailing edge noise. To calculate the acoustic performance of the piston engine we suggest to use an empirical noise model.

The paper demonstrates close agreement between computed and experimental data on power plants with tractor propellers. Experimental data on power plants noise was obtained during light aircraft of An-2, Yak-18T, MAI-223M and F30 acoustic trials under static conditions at the Moscow Aviation Institute airbase. The acoustic field herewith was supposed axisymmetric relative to the propeller axis, while test microphones were located at the ground level. It allowed exclude the interference of sound impact on measured noise levels.

The future trends of the study concerning improvement of the above mentioned method and extension the area of its application were formulated.

Keywords: propeller, propeller noise, piston engine noise, power plant noise, aeroacoustics, aircraft noise, unmanned aerial vehicle noise.

References

1. Moshkov P.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2015, no. 4, pp. 101-106.
2. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 50-61.
3. Gutin L.Ya. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1942, vol. 12, no. 2-3, pp. 76-85.
4. Nepomnyashchii E.Ya. *Trudy TsIAM*, 1941, no. 39, pp. 71-78.
5. Munin A.G., Kvitka V.E. *Aviatsionnaya akustika (Aviation acoustics)*, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 448 p.
6. Hanson D.B. Compressible helicoidal surface theory for propeller aerodynamics and noise. *AIAA Journal*, 1983, vol. 21, no. 6, pp. 881-889.
7. Ganabov V.I., Munin A.G. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1989, vol. XX, no. 5, pp. 43-52.
8. Kop'ev V.F., Titarev V.A., Belyaev I.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2014, vol. XLV, no. 2, pp. 78-106.
9. Moshkov P.A., Yakovlev A.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 6, pp. 275-277.
10. Samokhin V.F. *Trudy TsAGI*, 1988, no. 2355, pp. 65-75.
11. Samokhin V.F. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2012, vol. 85, no. 5, pp. 1064-1072.
12. Samokhin V.F. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2011, vol. 84, no. 3, pp. 554-564.
13. 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.
14. 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.

15. Dmitriev V.G., Samokhin V.F. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2014, vol. XLV, no. 2, pp. 137-157.
16. Malkin I.V. *Razrabotka tekhnicheskikh sredstv snizheniya shumovykh izlucheni sistem gazoobmena dvigatelya legkovogo avtomobilya* (Design of facilities for reducing car engine gas exchange system noise emissions). Doctor's thesis, Moscow, NAMI, 2014, 245 p.
17. Vakhitov Yu.R., Zagaiko S.A. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2010, vol. 9, no. 1, pp. 11-14.
18. Galevko V.V., Nadareishvili G.G., Yudin S.I. *Vektor nauki TGU*, 2013, vol. 25, no. 3, pp. 124-127.
19. Davis P.O.A.L., Holland K.R. IC engine intake and exhaust noise assessment. *Journal Sound and Vibration*, 1999, vol. 3, no. 223, pp. 425-444.
20. Yakovenko A.L. *Razrabotka metodiki i instrumental'nykh sredstv dlya prognozirovaniya strukturnogo shuma dvigatelya vnutrennego sgoraniya* (Design of techniques and tools for internal combustion engine structure-borne noise prediction). Abstract of PhD thesis. Moscow. MADI. 2009. 24 p.
21. Tupov V.V. *Bezopasnost' v tekhnosfere*, 2012, no. 6, pp. 63-69.
22. Moshkov P.A. *Vestnik SGAU*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 152-161.
23. Moshkov P.A. *Prognozirovanie i snizhenie shuma na mestnosti legkikh vintovykh samoletov* (Prediction and reduction of environmental noise generated by light propeller aircraft). Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2015, 143 p.
24. Hubbard H.H., Shepard K.P. Wind Turbine Acoustics. *NASA Technical Paper*, 1990, no. 3057, 50 p.
25. Samokhin V.F., Moshkov P.A. *Trudy MAI*. 2015. no. 82. URL: http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin_moshkov_rus.pdf (data publikatsii 26.06.2015).
26. Moshkov P.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 6, pp. 265-270.
27. Brooks T.F., Pope D.S., Marcolini M.A. Airfoil self-noise and prediction. *NASA References Publication*, 1989, no. 1218, 142 p.
28. Leslie A., Wong K.C., Auld D. Broadband noise reduction on a mini-UAV propeller. *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Vancouver, Canada, AIAA, 2008, pp. 2008-3069.
29. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2016, vol. 47, no. 6, pp. 55-60.