

## ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА ШУМА АВИАЦИОННЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2016 П. А. Мошков

Центральный аэрогидродинамический институт  
имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

В статье предложен эмпирический метод прогноза шума авиационных бензиновых двигателей с внешним смесеобразованием, применяемых в малой и беспилотной авиации. Этот метод основан на классических подходах авиационной акустики к расчёту шума на местности от различных источников. Спектр акустической мощности предлагается получать на основе эмпирической модели, по структуре схожей с известной моделью М. Хекла для расчёта шума наземных поршневых двигателей внутреннего сгорания, но учитывающей ключевые особенности авиационных двигателей. Показано согласование расчётных и экспериментальных данных по интегральным характеристикам акустического поля авиационных поршневых двигателей. Экспериментальные данные о шуме авиационных поршневых двигателей типа АШ-62ИР, М-14П, ROTAX-912ULS с капотом и без, ROTAX-582UL были получены при проведении акустических испытаний лёгких винтовых самолётов Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890У и МАИ-890 соответственно, в статических условиях на аэродроме базирования малой авиации. При этом акустическое поле поршневого двигателя полагалось осесимметричным относительно оси коленвала и шум двигателя определялся суммарным излучением на гармониках частоты следования вспышек в цилиндрах.

*Авиационный поршневой двигатель, шум авиационного двигателя, шум винтомоторной силовой установки, шум самолётов на местности.*

### Введение

Широкое развитие в России малой и беспилотной авиации и наличие требований к допустимым уровням шума, создаваемым военными и гражданскими воздушными судами на местности, делают актуальной проблему прогнозирования шума на местности 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 особенностей, а также от режима работы роль различных источников в шуме винтомоторной силовой установки будет различной [1].

В научной литературе, посвящённой исследованиям шума лёгких винтовых самолётов (ЛВС) на местности, в качестве

источника шума обычно рассматривается изолированный воздушный винт, работающий в невозмущённой среде. При этом не реализуется комплексный подход к шуму силовой установки самолёта в целом как к суперпозиции акустических полей, формируемых излучениями воздушного винта и поршневого двигателя. Вместе с тем существуют аналитические методы расчёта шума воздушных винтов [2-7] и различные алгоритмы и программы для расчёта шума на местности лёгких ЛА, у которых доминирует излучение от воздушного винта [8].

В отечественной и зарубежной литературе значительное внимание уделяется проблеме шума поршневых двигателей наземного применения и, в частности, проблемам шума системы газообмена [9-12] и структурного шума двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [13; 14].

В меньшей степени известно о направленности излучения различных типов двигателей. Вместе с тем, требования, предъявляемые к авиационным поршневым двигателям, существенным образом влияют на их рабочие характеристики и, как следствие, на акустические характеристики авиационных силовых установок по сравнению с наземными.

Поэтому разработка метода расчётной оценки акустических характеристик типовых авиационных двигателей является актуальной задачей на пути решения экологических проблем в малой и беспилотной авиации.

### Область применения предлагаемого метода

На сегодняшний день в авиации применяются несколько основных типов бензиновых поршневых двигателей с внешним смесеобразованием, среди которых можно выделить: четырёхтактные звёздообразные воздушного охлаждения большой мощности (типа АШ-62-ИР, М-14П), четырёхтактные жидкостно-

воздушного охлаждения (типа ROTAX-912ULS с глушителем шума выхлопа) и двухтактные двигатели (типа ROTAX-582UL с глушителем шума выхлопа). Основные параметры этих двигателей представлены в табл. 1 [15-18]. Двухтактные двигатели, по сравнению с четырёхтактными, характеризуются более высокими значениями литровой мощности. При одинаковой номинальной мощности меньшие габариты и массу имеет двигатель, у которого выше литровая мощность, однако такой двигатель может иметь и более высокие уровни шума. Поэтому при выборе типа силовой установки для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и сверхлёгких самолётов требуется согласовывать противоречивые требования к техническим и акустическим характеристикам двигателя.

В данной работе предложен метод прогнозирования интегральных характеристик акустического поля авиационных поршневых двигателей, подобных двигателям, указанным в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры исследуемых авиационных поршневых двигателей

Самолёт	Ан-2	Як-18Т	МАИ-223М, МАИ-890У	МАИ-890
Параметры/двигатель	АШ-62ИР	М-14П	ROTAX-912ULS	ROTAX-582UL
Тактность	4	4	4	2
Система охлаждения	воздушная	воздушная	жидкостно-воздушная	жидкостная
Рабочий объём двигателя, л	29,87	10,161	1,352	0,5807
Сухой вес двигателя, кг	560	214	56,6	27,4
Степень сжатия	6,4	6,3	10,5	11,5 (5,75)*
Максимальная мощность, кВт	735,5	264,8	73,55	40
Литровая мощность, кВт/л	24,62	26,06	54,4	68,88
Удельная мощность, кВт/кг	1,31	1,24	1,3	1,46
Эффективный крутящий момент, Н·м	3192,7	872	121	65,9

\*Для двухтактного двигателя ROTAX-582UL в скобках указана эффективная степень сжатия

### Метод расчёта шума авиационных поршневых двигателей

Суммарный уровень шума авиационного поршневого двигателя в дальнем звуковом поле может быть оценён при известной мощности акустического излучения двигателя ( $W$ ) по формуле:

$$L_{\varphi} = 10 \lg W + \Delta - 20 \lg R + 10 \lg \Phi, \quad (1)$$

где  $L_{\varphi}$  – суммарный уровень звукового давления (дБ) в направлении излучения;  $R$  – 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 определяется как разность между уровнями звуковых давлений исследуемого источника в некоторой точке  $L_{\text{изм}}$  и фиктивного ненаправленного источника той же мощности. Для рассматриваемых в работе типов двигателей будем определять значения  $10 \lg \Phi$  в дБ в зависимости от направления распространения звука согласно следующему соотношению [19]:

$$\begin{aligned} 10 \lg \Phi &= L_{\text{изм}} - 10 \lg \frac{W}{2\pi R^2 W_0} = \\ &= L_{\text{изм}} - L_W + 20 \lg R - 8. \end{aligned} \quad (2)$$

Экспериментальные данные по фактору направленности суммарного излучения типовых авиационных поршневых двигателей были получены автором на основании многочисленных акустических испытаний самолётов в статических условиях, выполненных на аэродроме Московского авиационного института [20-22]. На рис. 1 представлены зависимости факторов направленности, полученные по

осреднённым характеристикам направленности суммарного гармонического излучения поршневых двигателей.

Для двигателя ROTAX-912ULS получены факторы направленности для компоновок на самолёте без капота (самолёт МАИ-890У) и когда двигатель заключён в капот (самолёт МАИ-223М).

Максимумы факторов направленности излучения двигателей АШ-62ИР и ROTAX-912ULS соответствуют азимутальным углам  $0^\circ$  в передней полусфере и  $135-150^\circ$  – в задней полусфере. Вероятнее всего максимум в задней полусфере обусловлен шумом выхлопа двигателя, а максимум в передней полусфере обусловлен структурным шумом, распространяющимся через корпус.

Максимальные уровни шума двигателя ROTAX-582UL имеют место в направлении  $30^\circ$  в передней полусфере и  $150^\circ$  – в задней полусфере.

Излучение от двигателя М-14П происходит относительно равномерно по пространству в направлении углов  $60-120^\circ$ . Минимальные уровни шума двигателя наблюдаются по оси коленвала, т.е. в направлении  $0^\circ$  в передней полусфере и  $180^\circ$  – в задней полусфере. Существенное отличие в характеристиках направленности 9-цилиндровых двигателей воздушного охлаждения АШ-62ИР и М-14П обусловлено:

- различием в способах организации выхлопа;

- наличием у двигателя М-14П помимо капота дополнительных управляемых жалюзи, устанавливаемых для улучшения охлаждения цилиндров двигателя при полёте. В то же время жалюзи могут влиять на энергетические и пространственные характеристики структурного шума, распространяющегося через корпус двигателя.

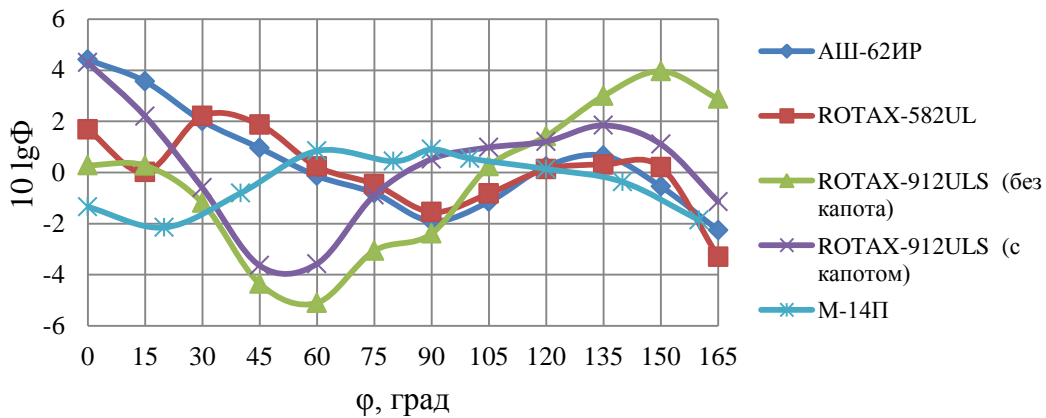


Рис. 1. Зависимость фактора направленности ( $10 \lg \Phi$ ) суммарного гармонического излучения авиационных поршневых двигателей (АШ-62ИР, М-14П, ROTAX-582UL, ROTAX-912ULS с капотом и без) от направления излучения

Также следует заметить, что излучение от поршневых двигателей АШ-62ИР и ROTAX-912ULS определяет суммарный уровень шума СУ самолётов Ан-2, МАИ-223М и МАИ-890У в передней полусфере в направлении  $0^\circ$  и в то же время излучение от воздушного винта, как правило, доминирует в задней полусфере в направлении  $105-120^\circ$  [20-22].

На основании выполненных экспериментальных исследований известная формула М. Хекла [23], предложенная для ДВС наземного применения, может быть скорректирована для расчёта спектров уровней звуковой мощности ( $L_{wf}$ ) типовых авиационных поршневых двигателей посредством введения в расчётное соотношение эмпирических коэффициентов, учитывающих влияние конструктивных особенностей двигателей на их акустические характеристики:

$$L_{wf} = A_i + 10 \lg \left( \frac{N_e n_n (1 + N_e / V_H)}{\frac{f}{f_1} + \frac{f_1}{f}} \right) + B_j \lg \left( \frac{n}{n_n} \right), \quad (3)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения коленвала (на взлётном режиме работы), (об/мин);  $f$  – центральная частота треть-октавной полосы (Гц);  $N_e$  – номинальная эффективная мощность (кВт);  $n$  – частота вращения коленвала на заданном режиме (об/мин);  $f_1$  – центральная частота треть-октавной полосы, соответствующая частоте излучения основного тона двигателя (Гц);  $A_i$  и  $B_j$  – эмпирические коэффициенты, представленные в табл. 2;  $V_H$  – рабочий объём двигателя (л).

Таблица 2. Коэффициенты в модели расчёта шума авиационных двигателей

Тип двигателя	АШ-62ИР	М-14П	ROTAX-912ULS (без капота)	ROTAX-582UL (без капота)	ROTAX-912ULS (с капотом)
Коэффициенты $A_i$	48	51	44	40	39
Коэффициенты $B_j$	38	17,5	65	68	65

Коэффициенты  $B_j$  получены из обобщённых энергетических характеристик поршневых двигателей [20] и характеризуют влияние режима работы на уровень шума.

Наличие глушителей в выхлопном тракте двигателей приводит к тому, что шум выхлопа перестаёт быть доминирующим источником (превышать по уровню на 10-15 дБ остальные источники) в суммарном шуме ДВС и существенную роль начинает играть так называемый структурный шум, распространяющийся в окружающую среду через корпус двигателя [1]. Поэтому при расчёте шума двигателей типа ROTAX-912ULS с глушителем шума выхлопа, заключённых в капот, следует использовать коэффициент  $A_i$  на 5 дБ ниже, чем для случая двигателя без капота (табл. 2). Величина снижения шума на 5 дБ была предложена на основании экспериментального исследования влияния капотирования на шум авиационной поршневой СУ [20; 24].

Согласно модели М. Хекла спектральный максимум третьоктавного спектра всегда будет расположен в фиксированной полосе с центральной частотой 1000 Гц. В предложенной модели спектральный максимум третьоктавного спектра предлагается принимать на частоте основного тона двигателя. При расчёте шума авиационного поршневого двигателя номинальным режимом следует считать взлётный режим работы СУ.

Можно видеть (табл. 1), что более показательным параметром, характеризующим авиационный двигатель, является, не принятая в модели М. Хекла удельная мощность, а литровая мощность двигателя. Поэтому литровая мощность используется в качестве параметра в предложенной расчётной модели.

Представленные факторы направленности (рис. 1) и коэффициенты в табл. 2 являются приближёнными, поскольку при расчёте мощности акустического излучения и характеристик направленности поршневого двигателя акустическое поле СУ полагалось осесимметричным относи-

тельно оси коленвала и считалось, что гармонические составляющие в шуме фактически определяют суммарное акустическое поле двигателя, так как выделить вихревую составляющую шума двигателя на фоне широкополосной составляющей шума воздушного винта на данном этапе исследований не представлялось возможным. Но в целом стоит отметить, что ожидаемая роль вихревой составляющей шума авиационного двигателя в суммарном шуме СУ крайне невелика, поскольку даже роль суммарного высокочастотного широкополосного излучения (1000-5000 Гц), вероятным доминирующим источником которого является вихревая пелена за лопастями, составляет не более 0,8-2,7% [21,22].

Таким образом, предложенная модель учитывает основные особенности известных авиационных двигателей по сравнению с двигателями наземного применения и, как следствие, отражает особенности механизмов генерации шума такими двигателями.

### Сравнение рассчитанных и измеренных суммарных уровней шума авиационных двигателей

На рис. 2 представлены рассчитанные и измеренные суммарные уровни звуковой мощности ( $L_w$ ) двигателя АШ-62ИР при работе по внешней скоростной характеристике. Также для сравнения на графике представлены данные расчёта по модели М. Хекла.

Можно видеть, что расчёт по модели Хекла не даёт удовлетворительных результатов и поэтому эту модель нецелесообразно использовать для расчёта шума авиационных поршневых двигателей. В то же время можно видеть хорошее согласование расчётных данных по предложенной модели с результатами эксперимента (за исключением нескольких режимов). Но даже для таких режимов отклонение расчётных и экспериментальных данных не превышает 2-3 дБ.

На рис. 3 представлены рассчитанные и измеренные характеристики

направленности суммарного излучения двигателя М-14П. Можно видеть согласо-

вание расчётных и экспериментальных данных в диапазоне углов 40-160°.

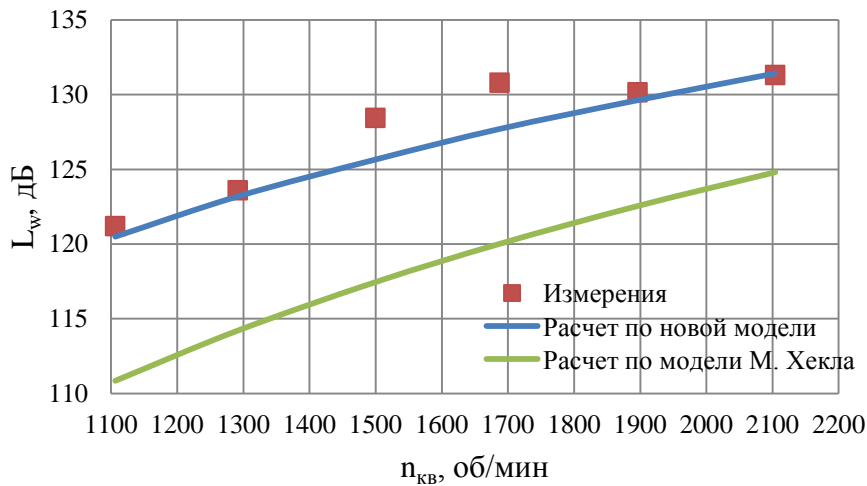


Рис. 2. Сравнение измеренных и рассчитанных уровней звуковой мощности двигателя АШ-62ИР

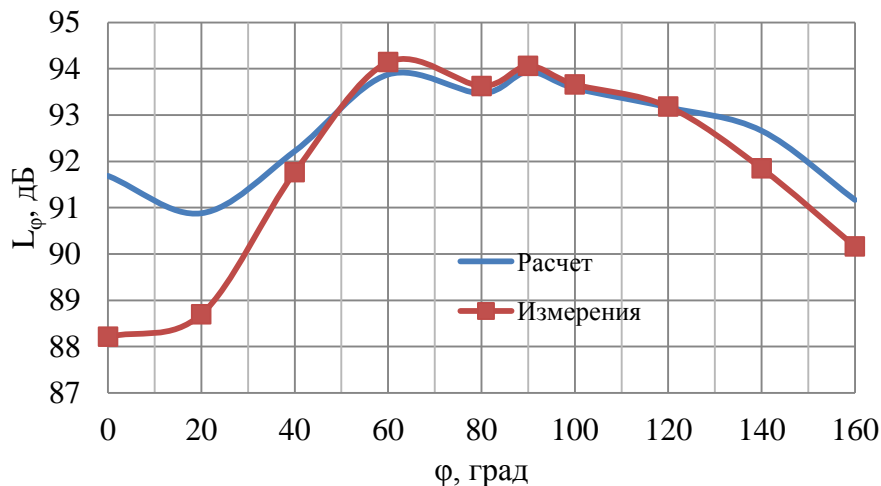


Рис. 3. Характеристика направленности шума поршневого двигателя М-14П ( $n_{кв}=2333$  об/мин, на расстоянии 30 м)

Коэффициент детерминации  $R^2$ , который является показателем качества предложенной расчётной модели, для двух представленных примеров расчёта: суммарного уровня звуковой мощности двигателя при работе по внешней скоростной характеристике и характеристики направленности двигателя изменяется в пределах  $0,88 < R^2 < 0,9$ . Полученные значения  $R^2 > 0,88$  свидетельствуют о хорошем качестве предложенной модели

при решении задачи прогнозирования шума типовых авиационных двигателей.

Следует заметить, что при расчёте шума лёгкомоторных самолётов на местности следует учитывать зависимость мощности двигателя от высоты полёта самолёта.

### Заключение

Предложенная модель для расчёта шума авиационных поршневых двигателей основных типов является эмпириче-

ской и используется для определения интегральных характеристик акустического поля бензиновых двигателей с внешним смесеобразованием. При этом рассматривается общее акустическое поле типовых авиационных двигателей, т.е. суммарный шум не подразделяется на отдельные со-

ставляющие. Модель учитывает особенности механизмов генерации шума авиационными поршневыми двигателями и влияние некоторых конструктивных особенностей на интенсивность акустического излучения.

### Библиографический список

1. Мошков П.А. Классификация источников шума лёгких винтовых самолётов на местности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 101-106.
2. Копьев В.Ф., Титарев В.А., Беляев И.В. Разработка методологии расчёта шума винтов с использованием суперкомпьютеров // Учёные записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV, № 2. С. 78-106.
3. Самохин В.Ф. Об одном подходе к расчёту дальнего акустического поля воздушного винта // Труды ЦАГИ. 1988. Вып. 2355. С. 65-75.
4. Самохин В.Ф. Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 5. С. 1064-1072.
5. Farassat F. Linear acoustic formulas for calculation of rotating blade noise // AIAA Journal. 1981. V. 19, Iss. 9. P. 1122-1130. DOI: 10.2514/3.60051
6. Hanson D.B. Helicoidal surface theory for harmonic noise of propellers in the far field // AIAA Journal. 1980. V. 18, Iss. 10. P. 1213-1220. DOI: 10.2514/3.50873
7. Hanson D.B. Compressible helicoidal surface theory for propeller aerodynamics and noise // AIAA Journal. 1983. V. 21, Iss. 6. P. 881-889. DOI: 10.2514/3.60132
8. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф. Комплекс алгоритмов и программ для расчёта шума самолётов на местности // Учёные записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV, № 2. С. 137-157.
9. Малкин И.В. Разработка технических средств снижения шумовых излучений системы газообмена двигателя легкового автомобиля. Дис. канд. техн. наук. Москва, 2014. 245 с.
10. Вахитов Ю.Р., Загайко С.А. Приближенный метод расчёта шума выпуска ДВС // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2010. № 1 (9). С. 11-14.
11. Davis P.O.A.L., Halliday R.F. Radiation of sound by a hot exhaust // Journal Sound and Vibration. 1981. V. 76. Iss. 4. P. 591-594. DOI: 10.1016/0022-460x(81)90272-8
12. Davis P.O.A.L., Holland K.R. I.C. engine intake and exhaust noise assessment // Journal Sound and Vibration. 1999. V. 223, Iss. 3. P. 425-444. DOI: 10.1006/jsvi.1998.2093
13. Яковенко А.Л. Разработка методики и инструментальных средств для прогнозирования структурного шума двигателя внутреннего сгорания. Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 2009. 24 с.
14. Тупов В.В. Структурный шум ДВС с воздушной системой охлаждения и методы его снижения // Безопасность в техносфере. 2012. № 6. С. 63-69.
15. Лабазин П.С. Авиационный двигатель АШ-62ИР. М.: Транспорт, 1972. 354 с.
16. Руководство по технической эксплуатации самолёта «МАИ-223М». М.: МАИ, 2013. 138 с.
17. Лапшин А.М., Анохин П.И. Авиационный двигатель М-14П: уч. пособие для лётных училищ. М.: Транспорт, 1976. 229 с.
18. Руководство по эксплуатации двигателя ROTAX-582UL. <http://aviagamma.ru/om2.pdf>

19. Расчёты и измерения характеристик шума, создаваемого в дальнем звуковом поле реактивными самолётами / под ред. Л.И. Соркина. М.: Машиностроение, 1968. 99 с.
20. Мошков П.А. Прогнозирование и снижение шума на местности лёгких винтовых самолётов. Дис. канд. техн. наук. Москва, 2015. 143 с.
21. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Экспериментальное исследование акустических характеристик силовой установки самолёта «Ан-2» в статических условиях // Труды МАИ. 2015. № 82. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58711>
22. Мошков П.А. Некоторые результаты экспериментального исследования акустических характеристик силовой установки сверхлёгкого самолёта в статических условиях // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 265-270.
23. Справочник по технической акустике / под ред. М. Хекла, Х.А. Мюллера. Л.: Судостроение, 1980. 440 с.
24. Мошков П.А., Яковлев А.А. Экспериментальное исследование влияния капотирования двигателя на акустические характеристики авиационной поршневого силового установки // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 271-274.

### Информация об авторе

**Мошков Пётр Александрович**, инженер, Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский. E-mail: moshkov89@bk.ru. Область научных интересов: экспериментальные исследования акустических характеристик лёгких самолётов и беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой.

## EMPIRICAL METOD OF PREDICTING AVIATION PISTON ENGINE NOISE

© 2016 P. A. Moshkov

Central Institute of Aerohydrodynamics named after N.E. Zhukovsky,  
Zhukovsky, Russian Federation

The article suggests an empirical method of predicting noise of aircraft gasoline engines with carburetion used in light and unmanned aviation. The method is based on classical approaches of aeroacoustics to the calculation of environmental noise from different sources. The spectrum of acoustic power is proposed to be obtained on the basis of an empirical model similar to the known M. Khekl model for the calculation of noise of internal combustion piston engines of ground application, but at the same time taking into account the key features of aircraft engines. The calculated and experimental data on integral characteristics of the acoustic field of aviation piston engines are shown to be in good agreement. Experimental data on the noise of aviation piston engines like Ash-62IR, M-14P, ROTAX-912ULS with and without cowling, ROTAX-582UL were obtained during acoustic tests of light propeller aircraft An-2, Yak-18T, MAI-223M, MAI- 890U and MAI-890, respectively, under static conditions at a local aerodrome. At the same time the acoustic field of the piston engine was supposed to be axially symmetrical relative to the crankshaft axis and the noise of the engine was determined by the total radiation at the harmonics of flash recurrence rate in the cylinders.

*Aviation piston engine, aviation engine noise, propeller power plant noise, environmental aircraft noise.*

---

*Citation:* Moshkov P.A. Empirical metod of predicting aviation piston engine noise. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 152-161. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-152-161



## References

1. Moshkov P.A. Classification of community noise source by light propeller aircrafts. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2015. No. 4. P. 101-106. (In Russ.)
2. Kopiev V.F., Titarev V.A., Belyaev I.V. Development of a methodology for propeller noise calculation on high-performance computer. *TsAGI Science Journal*. 2014. V. 45, Iss. 3-4. P. 293-327. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2014011857
3. Samokhin V.F. An approach to the calculation of the far-field propeller noise. *Trudy TsAGI*. 1988. Iss. 2355. P. 65-75. (In Russ.)
4. Samokhin V.F. Semiempirical method for estimating the noise of a propeller. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012. V. 85, Iss. 5. P. 1157-1166. DOI: 10.1007/s10891-012-0758-y
5. Farassat F. Linear acoustic formulas for calculation of rotating blade noise. *AIAA Journal*. 1981. V. 19, Iss. 9. P. 1122-1130. DOI: 10.2514/3.60051
6. Hanson D.B. Helicoidal surface theory for harmonic noise of propellers in the far field. *AIAA Journal*. 1980. V. 18, Iss. 10. P. 1213-1220. DOI: 10.2514/3.50873
7. Hanson D.B. Compressible helicoidal surface theory for propeller aerodynamics and noise. *AIAA Journal*. 1983. V. 21, Iss. 6. P. 881-889. DOI: 10.2514/3.60132
8. Dmitriev V.G., Samokhin V.F. Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise. *TsAGI Science Journal*. 2014. V. 45, Iss. 3-4. P. 367-388. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2014011838
9. Malkin I.V. *Razrabotka tekhnicheskikh sredstv snizheniya shumovykh izlucheniya sistemy gazoobmena dvigatelya legkovogo avtomobilya*. Diss. cand. tekhn. nauk [Development of facilities for reducing noise emissions of the car engine gas exchange system. Cand. Sc. (Eng.) dissertation]. Moscow, 2014. 245 p.
10. Vakhitov Yu.R., Zagayko S.A. Approximate Method for Calculating of the Noise of Internal Combustion Engine Exhaust. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2010. No.1 (9). P. 11-14. (In Russ.)
11. Davis P.O.A.L., Halliday R.F. Radiation of sound by a hot exhaust. *Journal Sound and Vibration*. 1981. V. 76, Iss. 4. P. 591-594. DOI: 10.1016/0022-460x(81)90272-8
12. Davis P.O.A.L., Holland K.R. I.C. engine intake and exhaust noise assessment. *Journal Sound and Vibration*. 1999. V. 223, Iss. 3. P. 425-444. DOI: 10.1006/jsvi.1998.2093
13. Yakovenko A.L. *Razrabotka metodiki i instrumental'nykh sredstv dlya prognozirovaniya strukturnogo shuma dvigatelya vnutrennego sgoraniya*. Avtoref. diss. cand. tekhn. nauk [Development of tools and techniques to predict structure-borne noise of the internal combustion engine. Extended abstract of dissertation in Engineering Science]. Moscow, 2009. 24 p.
14. Tupov V.V. Noise of petrol engine with air cooling system and methods of its decrease. *Safety in Technosphere*. 2012. No. 6. P. 63-69. (In Russ.)
15. Labazin P.S. *Aviatsionnyy dvigatel' ASh-62IR* [ASH-62IR aircraft engine]. Moscow: Transport Publ., 1972. 354 p.
16. *Rukovodstvo po tekhnicheskoy ekspluatatsii samoleta «MAI-223M»* [Operations manual for «MAI-223 M» aircraft engine]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2013. 138 p.
17. Lapshin A.M., Anokhin P.I. *Aviatsionnyy dvigatel' M-14P* [M-14P Aircraft engines]. Moscow: Transport Publ., 1976. 229 p.
18. *Rukovodstvo po ekspluatatsii dvigatelya ROTAX-582UL* [Operations manual for the ROTAX-582ULS engine]. Available at: <http://aviagamma.ru/om2.pdf>
19. *Raschety i izmereniya kharakteristik shuma, sozdavaemogo v dal'nem zvukovom pole reaktivnymi samoletami/ pod red. L.I. Sorkina* [Calculations and measurements of the

characteristics of noise generated in the far acoustic field by jet aircraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 99 p.

20. Moshkov P.A. *Prognozirovaniye i snizheniye shuma na mestnosti legkikh vintovykh samoletov*. Diss. cand. tekhn. nauk [Prediction and reduction of environmental noise generated by light propeller aircraft. Cand. Sc. (Eng.) dissertation]. Moscow, 2015. 143 p.

21. Samokhin V.F., Moshkov P.A. Experimental research of acoustical characteristics by power plant of aircraft «An-2» in static conditions. *Trudy MAI*. 2015. No. 82. (In Russ.) Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58711>

22. Moshkov P.A. Some results of experimental research of acoustic characteristics by the powerplant ultralight aircraft in static conditions. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2014. No. 6. P. 265-270. (In Russ.)

23. Khekl M., Myuller Kh.A. *Spravochnik po tekhnicheskoy akustike* [Handbook of Technical Acoustics]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1980. 440 p.

24. Moshkov P.A., Yakovlev A.A. Experimental research of effect of the nose-over of the engine on acoustical characteristics of the aviation piston power plant. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2014. No. 6. P. 271-274. (In Russ.)

#### About the author

**Moshkov Petr Aleksandrovich**, engineer, Central Institute of Aerohydrodynamics named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russian Federation. E-mail: [moshkov89@bk.ru](mailto:moshkov89@bk.ru). Area of Research: application of experimental study of acoustic characteristics of light aircraft and unmanned aerial vehicles with an engine-propeller power plant.