

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА «ПТЕРО-G0» В ЗАГЛУШЕННОЙ КАМЕРЕ АК-2

Беляев И.В.<sup>1\*</sup>, Валиев А.В.<sup>2\*\*</sup>, Мошков П.А.<sup>3\*\*\*</sup>, Остриков Н.Н.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, ЦАГИ, ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия

<sup>2</sup> АФМ-Серверс,

ул. Зорге, 20, Москва, 125252, Россия

<sup>3</sup> «Гражданские самолеты Сухого»,

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

\* e-mail: aeroacoustics@mktsagi.ru

\*\* e-mail: uav@ptero.ru

\*\*\* e-mail: moshkov89@bk.ru

---

Представлены основные результаты экспериментального исследования акустических характеристик малоразмерного беспилотного летательного аппарата самолетного типа в заглушенной камере АК-2 Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Получены энергетические, спектральные и пространственные характеристики акустического излучения винтомоторной силовой установки. Исследовано влияние вибраций капота и диаметра винта на характеристики акустического поля поршневого силового двигателя. Получена база данных по шуму летательного аппарата на различных режимах горизонтального полета. В результате выполненного исследования разработчикам даны рекомендации по снижению шума и заметности беспилотного летательного аппарата «Птеро-G0».

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, дрон, винтомоторная силовая установка, воздушный винт, авиационный поршневой двигатель, шум беспилотника, шум силовой установки, акустические испытания.

---

### Введение

В последнее время в связи с широким использованием авиационных систем с малоразмерными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) для решения задач специального назначения все большее внимание уделяется проблеме обеспечения их незаметности в различных диапазонах частот. Для обеспечения незаметности БПЛА в слышимом диапазоне частот на заданном удалении от наблюдателя в условиях известной местности применения необходимо иметь качественные данные об акустических характеристиках БПЛА [1]. Для получения данных о спектральном портрете БПЛА необходимо выполнять качественные акустические измерения в акустических камерах, в заглушенных аэродинамических трубах или в условиях открытой местности [2–7]. Имея данные о спектральном портрете БПЛА, можно оценить его акустические характеристики на местности с помощью известных алгоритмов и программ [8], а также обеспечить трассы полета БПЛА без возможности обнаружения на-

блюдателем как на слух, так и с помощью акустического пеленгатора.

Данная работа была представлена авторами в качестве доклада на XI Международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиасалон-2016» [9]. Она является продолжением исследований авторами акустических характеристик беспилотных летательных аппаратов [7] и легких самолетов с винтомоторной силовой установкой [10, 11].

### Объект исследования и методика проведения акустических испытаний

В заглушенной камере АК-2 ЦАГИ было выполнено исследование акустических характеристик БПЛА «Птеро-G0», разработанного компанией «АФМ-Серверс» [12]. Общий вид БПЛА при проведении испытаний представлен на рис. 1.

В состав силовой установки (СУ) БПЛА входит одноцилиндровый бензиновый двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и тянущий двухлопастной

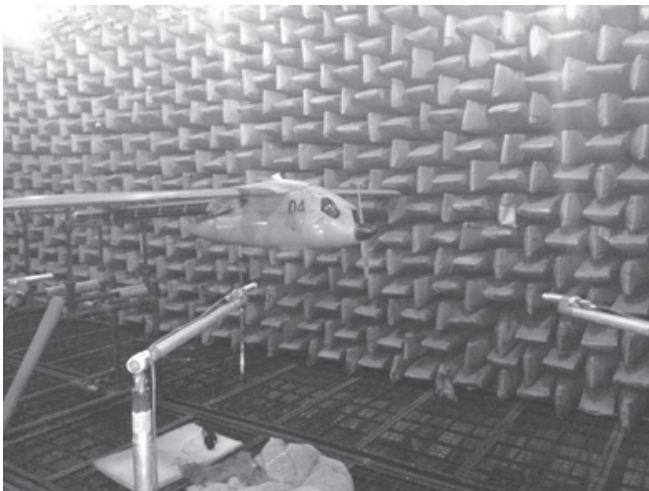


Рис. 1. Общий вид расположения БПЛА при проведении акустических испытаний

малоразмерный воздушный винт неизменяемого шага. Отметим, что воздушный винт рассматриваемого БПЛА работает при низких числах Рейнольдса ( $Re \approx 2 \cdot 10^5$ ), что существенным образом может влиять на его аэродинамические и акустические характеристики [13, 14] по сравнению с винтами, работающими на режиме автотельности  $Re > 10^6$ .

Измерительные точки располагались на уровне оси коленвала на окружности радиусом 2 м. Диапазон измерений соответствовал азимутальным углам от 30 до 135° с шагом 15° относительно оси коленвала двигателя (рис. 2).

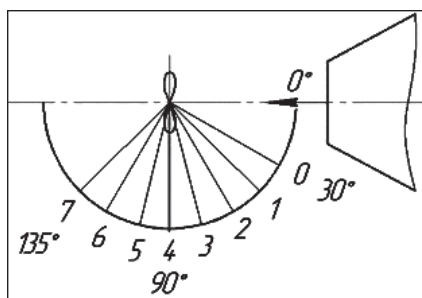


Рис. 2. Схема расположения точек измерения шума на окружности радиусом  $R = 2$  м в АК-2 (расстояние от среза сопла до плоскости вращения винта 1,7 м, диаметр сопла 0,8 м)

Сигналы с микрофонов поступали на многоканальную систему сбора и обработки данных PULSE фирмы Briel & Kjaer. Обработка измеряемого звукового сигнала включала в себя получение узкополосных спектров с шириной полосы 2 Гц в диапазоне частот 20—12800 Гц и третьоктавных спектров уровней звукового давления в диапазоне центральных частот 20—12500 Гц.

Акустические испытания были выполнены как при наличии набегающего потока, так и без него

(статические условия). Диапазон изменения скоростей потока соответствовал диапазону скоростей полета БПЛА. Исследовались воздушные винты различных диаметров, но одного профиля; винт меньшего диаметра имел лопасти со срезанной законцовкой. В статических условиях были выполнены измерения шума БПЛА с капотом и без. Измерения выполнялись как при наличии крыльев, так и без них, а также при различных углах атаки БПЛА, но эти аспекты в рамках данной работы не рассматриваются. Отметим, что общий объем акустических измерений соответствовал 108 режимам совместной работы силовой установки и АК-2. С целью использования полученной базы данных для валидации численных методов расчета шума воздушного винта было выполнено сканирование лопасти (рис. 3).

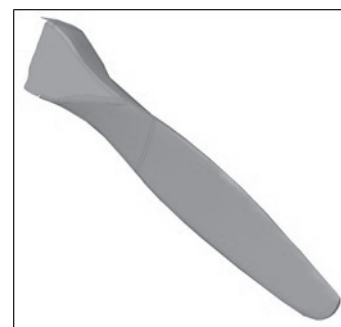


Рис. 3. Трехмерная модель лопасти воздушного винта, полученная в результате сканирования

### Основные результаты акустических испытаний

#### Спектральные характеристики акустического излучения СУ БПЛА «Птеро-G0»

Спектр акустического излучения винтомоторной силовой установки представляет собой суперпозицию полей, формируемых излучениями воздушного винта и поршневого двигателя. При этом в спектре присутствуют тональные и широкополосные составляющие. Подробно классификация источников шума и особенности механизмов генерации шума воздушным винтом и поршневым авиационным двигателем рассмотрены в работах [1, 15, 16].

На рис. 4 представлен типовой узкополосный спектр уровней звукового давления, измеренных при работе силовой установки БПЛА в статических условиях. На графике цифрами с индексами «д» и «в» обозначены гармоники на частотах, кратных частоте следования вспышек в цилиндре двигателя, и гармоники на частотах, кратных частоте следования лопастей воздушного винта. Можно видеть, что частота 4-й гармоники шума двигателя и 1-й гармоники винта, 8-й гармоники шума двига-

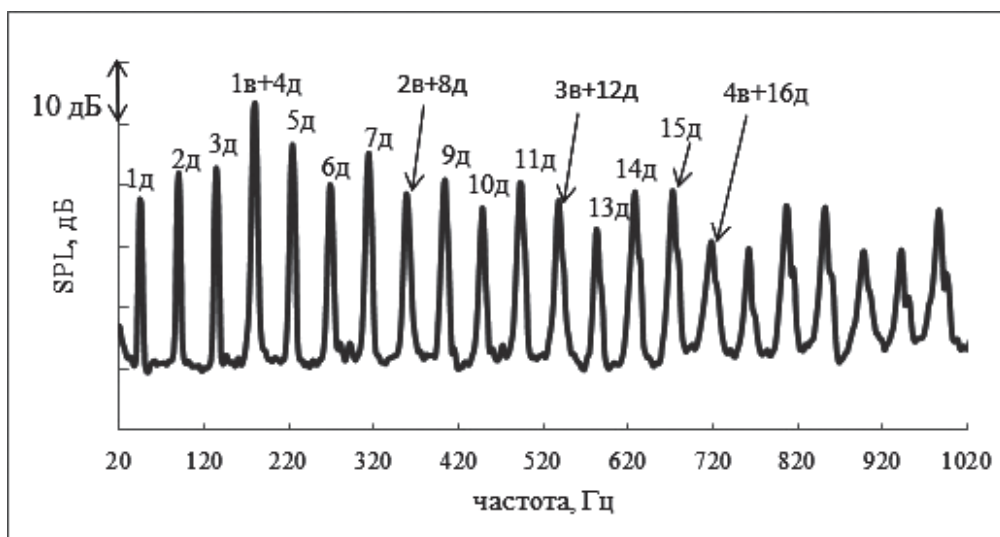


Рис. 4. Узкополосный спектр уровней звукового давления в диапазоне частот 20—1020 Гц с шириной полосы 2 Гц, частота вращения коленвала двигателя  $n_{кв} = 5400$  об/мин, направление измерения  $\varphi = 120^\circ$  — задняя полу-сфера,  $R = 2$  м, статические условия

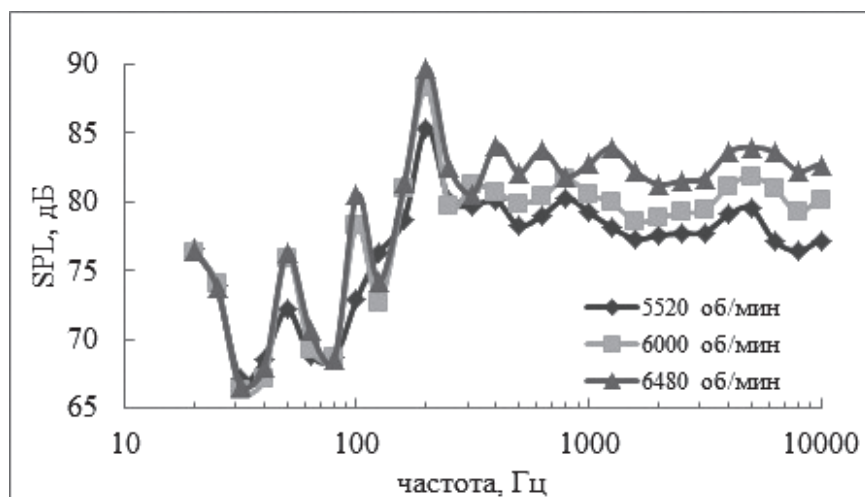


Рис. 5. Влияние режима работы СУ на третьоктавный спектр уровней звукового давления (скорость набегающего потока  $V = 30$  м/с,  $\varphi = 120^\circ$ ,  $R = 2$  м)

теля и 2-й гармоники винта и т.д. совпадают. При дальнейшем анализе шума двигателя будут использоваться только гармоники, которые гарантированно относятся к излучению двигателя, поскольку разделить эти источники на одной частоте не представляется возможным без проведения дополнительных исследований. В то же время будем полагать, что в спектре излучения на частоте первой гармоники шума винта и 4-й гармоники шума двигателя интенсивность излучения от винта является доминирующей.

С целью разделения источников на одной частоте в дальнейшем можно выполнить исследования при других способах нагружения двигателя или используя в качестве привода воздушного винта электродвигатель.

Влияние частоты вращения коленвала на третьоктавный спектр уровней звукового давления при постоянной скорости набегающего потока представ-

лено на рис. 5. Увеличение частоты вращения винта ожидаемо приводит к возрастанию спектральных уровней в диапазоне частот 40—10000 Гц.

Увеличение скорости набегающего потока при постоянной частоте вращения коленвала приводит к увеличению характерной скорости обтекания профиля лопасти и нагрузки на двигатель и, как следствие, к увеличению спектральных уровней в диапазоне частот 40—10000 Гц (рис. 6).

#### *Энергетические и пространственные характеристики акустического поля малоразмерного воздушного винта*

На рис. 7 представлены характеристики направленности первой гармоники шума винта, полученные при измерениях в статических условиях и при наличии набегающего потока при постоянной частоте вращения воздушного винта. Полученные характеристики направленности шума малоразмер-

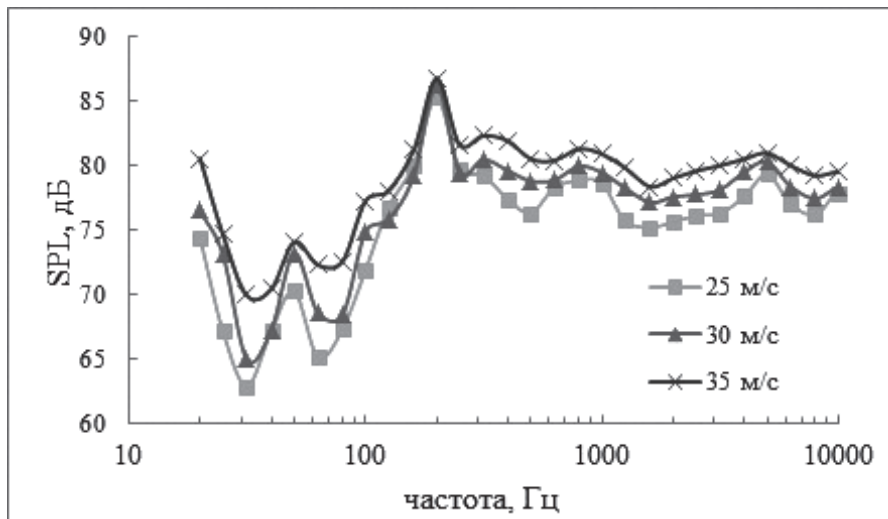


Рис. 6. Влияние скорости набегающего потока на третьоктавный спектр уровней звукового давления ( $n_{кв} = 5520$  об/мин,  $\varphi = 120^\circ$ )

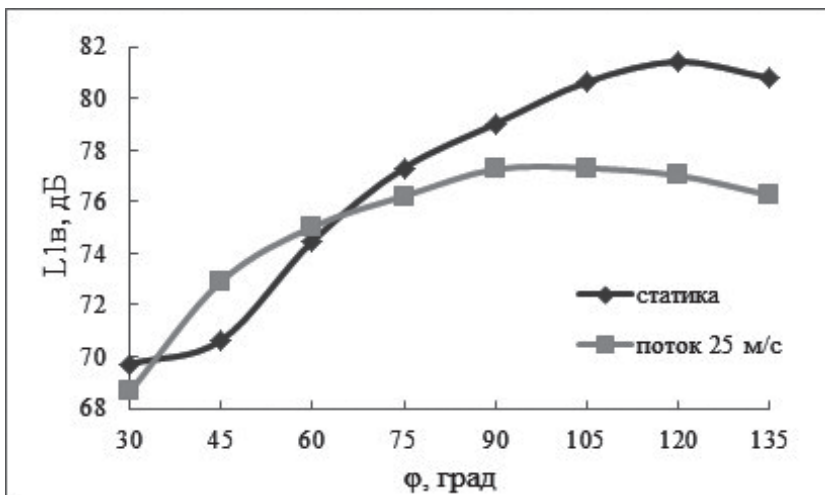


Рис. 7. Характеристики направленности 1-й гармоники шума малоразмерного винта в полетных и в статических условиях ( $n_{кв} = 5070$  об/мин)

ного винта существенным образом отличаются от результатов исследований шума натуральных винтов [1, 17, 18], хотя максимум излучения также расположен в задней полусфере ( $105-120^\circ$ ), что свидетельствует о доминирующей роли шума от аэродинамической нагрузки в излучении на частоте первой гармоники шума винта.

При работе воздушного винта в статических условиях была получена зависимость звуковой мощности первой гармоники шума винта  $W_{1B}$  от частоты вращения  $n_b$ :

$$W_{1B} \propto n_b^{7,5}. \quad (1)$$

При наличии набегающего потока была получена зависимость звуковой мощности первой гармоники шума винта от числа Маха относительной скорости потока в концевом сечении лопасти воздушного винта  $M_{отн}$ :

$$W_{1B} \propto M_{отн}^{4,3}. \quad (2)$$

Полученные энергетические и пространственные характеристики будут использоваться при разработке полуэмпирической модели шума воздушных винтов, работающих при низких числах Рейнольдса.

#### Энергетические и пространственные характеристики шума поршневого двигателя

На рис. 8 представлены характеристики направленности отдельных гармонических составляющих шума, а также суммарного тонального излучения поршневого двигателя. Номера тональных составляющих соответствуют данным на рис. 4. Можно видеть, что основным тоном, определяющим интенсивность суммарного излучения, является пятая гармоника шума двигателя, которая и формирует направленность суммарного шума двигателя в диапазоне азимутальных углов  $60-135^\circ$ . Сложная пространственная структура излучения отдельных гармоник шума двигателя может свидетельствовать о



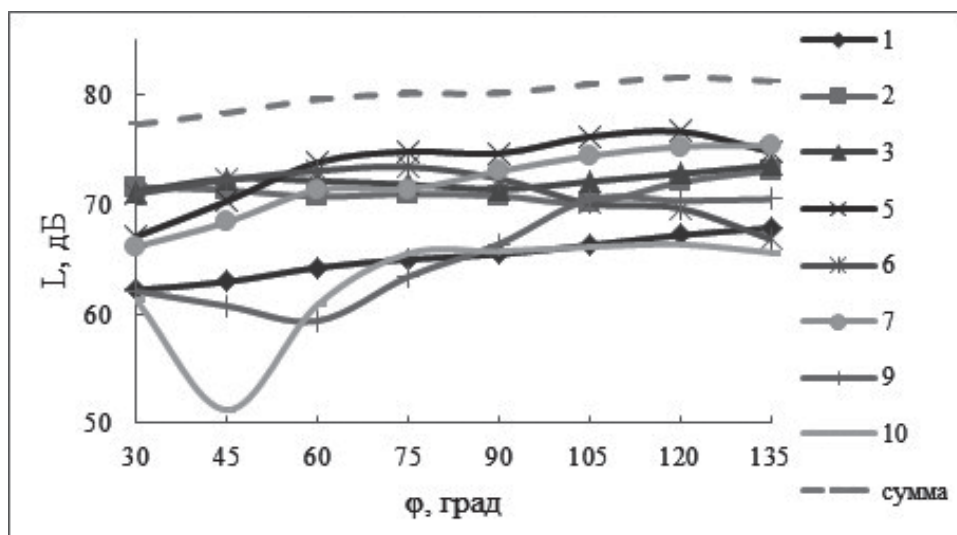


Рис. 8. Характеристики направленности тональных составляющих шума поршневого двигателя ( $n_{кв} = 5400$  об/мин,  $R = 2$  м, статические условия)

том, что на различных гармониках доминируют разные источники излучения.

При работе двигателя в статических условиях была получена зависимость звуковой мощности суммарного тонального излучения двигателя  $W_d$  от частоты вращения коленвала:

$$W_d \propto n_{кв}^{4,6} \quad (3)$$

**Влияние полетных условий на интенсивность и направленность шума двигателя**

На рис. 9 представлены характеристики направленности суммарного акустического излучения двигателя, полученные в статических условиях и при наличии набегающего потока. Характерные максимумы излучения наблюдаются в направлении выхлопа двигателя (110–120°) в задней полусфере.

В абсолютных величинах уровень шума двигателя при наличии потока несколько ниже (на 1–4 дБ), чем в статических условиях. При наличии потока двигатель является менее нагруженным, что и приводит к снижению интенсивности излучения и изменению характеристики направленности.

Полученные экспериментальные данные о направленности излучения поршневого двигателя не противоречат результатам ранее выполненных исследований [1, 18], а также работам других авторов [19].

**Влияние вибраций капота на шум СУ**

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 [20]. Было показано, что установка

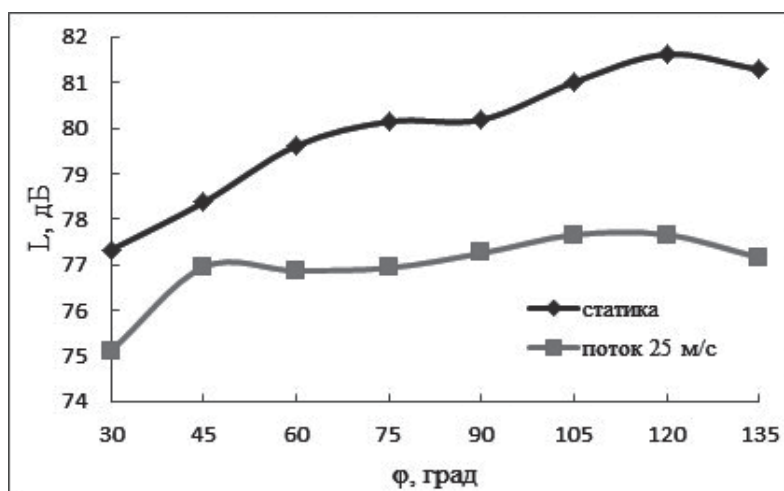


Рис. 9. Характеристики направленности суммарного излучения одноцилиндрового двигателя в полетных и в статических условиях ( $n_{кв} = 5400$  об/мин)

капота на двигатель с заглушенным выхлопом приводит к снижению роли основного тона двигателя в суммарном шуме силовой установки от ~18% до ~3% в широком диапазоне режимов работы [16]. 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.

На рис. 10 показано сравнение суммарных уровней звукового давления (20—10000 Гц), измеренных при испытаниях СУ в статических условиях с капотом и без него.

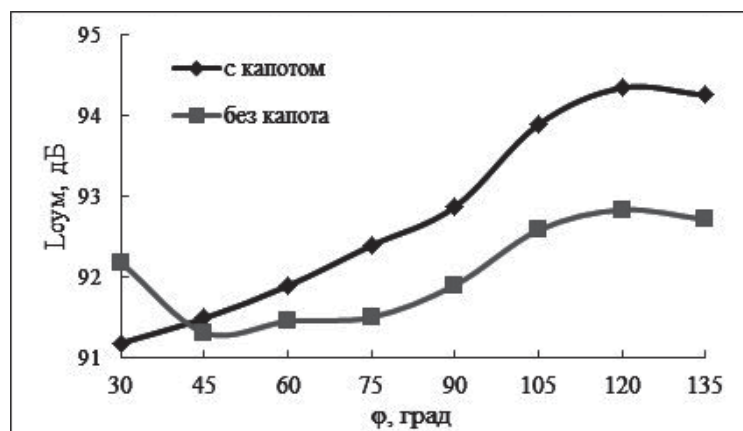


Рис. 10. Влияние капота на характеристику направленности суммарного излучения СУ БПЛА ( $n_{кв} = 5400$  об/мин, статические условия,  $R = 2$  м)

Можно видеть, что наличие капота без системы вибро- и звукоизоляции приводит к увеличению суммарных уровней звукового давления на ~1,5 дБ во всем диапазоне рассматриваемых направлений распространения излучения, за исключением направления 30°, где, вероятнее всего, при отсутствии

капота доминирует структурный шум ДВС. Увеличение суммарных уровней шума обусловлено увеличением спектральных уровней в диапазоне частот 200—2000 Гц (рис. 11).

Таким образом, при установке капота на двигатель необходимо обеспечить его виброизоляцию, чтобы избежать повышенных вибраций, которые могут являться дополнительным существенным источником шума. Соответствующие рекомендации были даны разработчикам БПЛА «Птеро-G0».

### Применение эмпирической модели для оценки шума одноцилиндрового бензинового двигателя

Выполненные экспериментальные исследования шума одноцилиндрового четырехтактного бен-

зинового двигателя, располагаемой мощностью 2,9 кВт, позволили определить коэффициенты в эмпирической модели шума авиационных двигателей [21, 22] и факторы направленности, необходимые для оценки шума аналогичных ДВС.

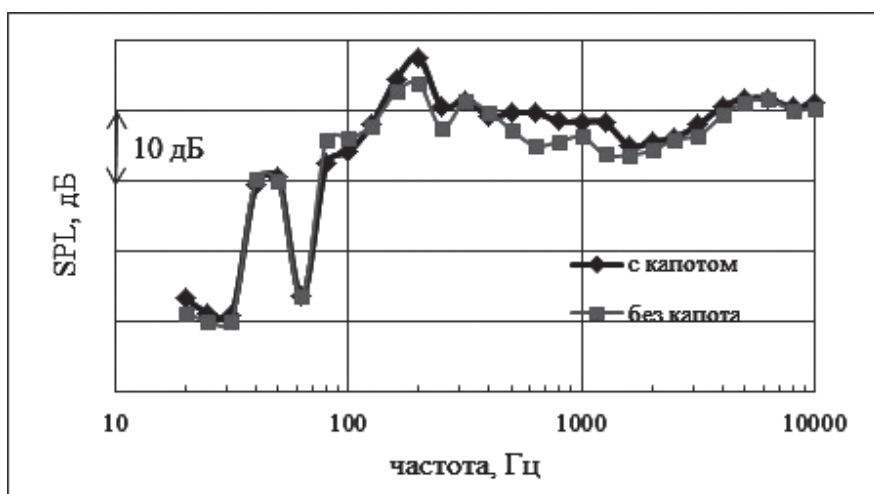


Рис. 11. Влияние капота на третьоктавный спектр уровней звукового давления ( $\phi = 120^\circ$ ,  $n_{кв} = 5400$  об/мин,  $R = 2$  м)

На рис. 12 представлено сравнение рассчитанных по эмпирической модели суммарных уровней звуковой мощности тональных составляющих шума поршневого двигателя и экспериментальных данных. Для всех рассматриваемых режимов работы двигателя отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 1 дБ. Аналогичная точность получена при расчете характеристики направленности шума двигателя (рис. 13).

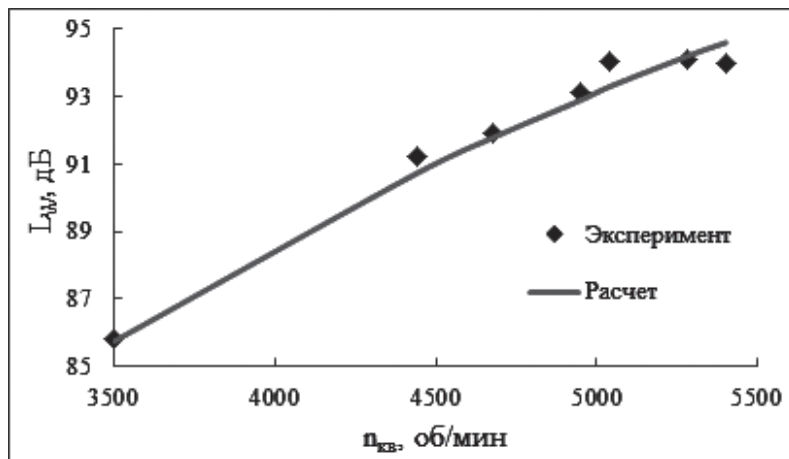


Рис. 12. Сравнение расчетных и измеренных суммарных уровней звуковой мощности тональных составляющих шума поршневого двигателя в зависимости от частоты вращения коленвала двигателя

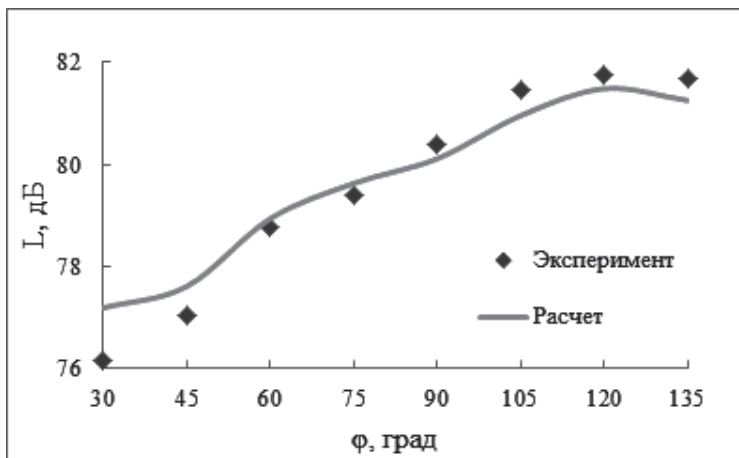


Рис. 13. Сравнение расчетных и измеренных характеристик направленности суммарного уровня тональных составляющих шума поршневого двигателя ( $n_{кв} = 5100$  об/мин, статические условия,  $R = 2$  м)

### Оценка влияния диаметра винта на границы слышимости БПЛА «Птеро-G0»

Уменьшение диаметра малоразмерного БПЛА на 6 % приводит к снижению суммарного по спектру уровня шума (20—10000 Гц) на ~1,5 дБ во всем диапазоне рассматриваемых азимутальных углов (рис. 14) при постоянстве частоты вращения коленвала двигателя. Данное снижение обусловлено уменьшением интенсивности тональных и широкополосных составляющих шума воздушного винта и двигателя в диапазоне частот 200—10000 Гц

(рис. 15). Тяга винта и нагрузка на двигатель при постоянной частоте вращения коленвала меньше в случае винта меньшего диаметра, что и объясняет эффект снижения шума.

Отметим, что более корректной была бы оценка влияния диаметра винта при условии постоянства тяги винтов, которое, вероятнее всего, достигается для аэродинамически подобных винтов при постоянстве числа Маха относительной скорости

потока на характерном радиусе лопасти, как правило, на расстоянии 0,75 радиуса. В данной работе эти аспекты не рассматриваются, но было установлено, что тяги винта меньшего диаметра достаточно для выполнения горизонтального полета БПЛА без потери скорости, и ставилась задача оценить влияние незначительного уменьшения диаметра винта на характеристики шума и заметности БПЛА «Птеро-G0».

На основе известных алгоритмов и программ [8], а также экспериментальных данных, можно

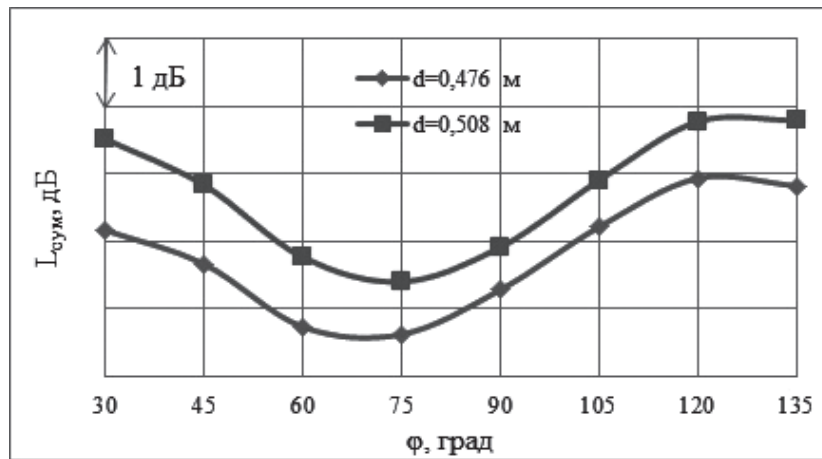


Рис. 14. Влияние диаметра винта на характеристику направленности суммарного излучения СУ БПЛА ( $n_{кв} = 5760$  об/мин,  $V=30$  м/с,  $R = 2$  м)

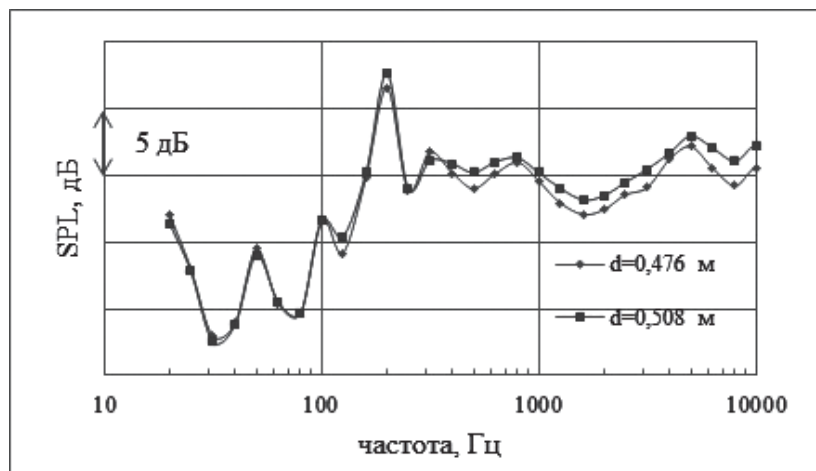


Рис. 15. Влияние диаметра винта на третьоктавный спектр уровней звукового давления ( $\varphi = 120^\circ$ ,  $n_{кв} = 5760$  об/мин,  $V = 30$  м/с,  $R = 2$  м)

оценить влияние диаметра винта на границы слышимости и заметности БПЛА в условиях стандартной или нестандартной атмосферы [23]. Для условий стандартной атмосферы было получено, что БПЛА «Птеро-G0» с винтом меньшего диаметра, выполняя крейсерский горизонтальный полет на малой высоте, может приблизиться на  $\approx 200$  м к контрольной точке на местности без возможности обнаружения наблюдателем.

Полученные результаты исследования влияния диаметра на шум винта не противоречат результатам ранее выполненных исследований [24–26].

### Выводы

Экспериментальное исследование акустических характеристик БПЛА «Птеро-G0» в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ дало следующие основные результаты:

1. Получены энергетические, спектральные и пространственные характеристики акустических

полей малоразмерного воздушного винта и одноцилиндрового четырехтактного бензинового двигателя.

2. Изучено влияние диаметра малоразмерного воздушного винта на характеристики шума и заметности БПЛА. Даны рекомендации по снижению акустической заметности БПЛА «Птеро-G0», которые были внедрены и учитываются при разработке компанией «АФМ-Серверс» новых аппаратов.

3. Показано, что установка капота на двигатель без системы вибро- и звукоизоляции может приводить к существенному повышению шума СУ.

4. Показана возможность использования эмпирической модели при решении задачи оценки шума одноцилиндрового четырехтактного ДВС.

В заключение можно сформулировать основные направления дальнейших исследований в рамках изучения акустики БПЛА:

1. Исследование влияния экранирования шума СУ элементами планера самолета [27] на характеристики шума и заметности БПЛА.



2. Исследование шума обтекания планера БПЛА [28—30].

3. Разработка полуэмпирической модели шума малоразмерных воздушных винтов.

4. Внедрение существующих методов расчета границ слышимости и заметности в практику оценки шумовых показателей различных БПЛА.

5. Разработка программного обеспечения с целью построения траекторий полета БПЛА при известных погодных и ландшафтных условиях без возможности его обнаружения как на слух, так и при помощи акустического пеленгатора [31].

### Библиографический список

1. *Мошков П.А.* Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: Дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 143 с.
2. *Kloet N., Watkins S., Clothier R.* Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems // *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2017. Vol. 9. No. 1, pp. 3-14.
3. *Sinibaldi G., Marino L.* Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV // *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. No. 1, pp. 79-88.
4. *Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S.R.* Acoustic signature of an unmanned air vehicle exploitation for aircraft localisation and parameter estimation // *Defence Science Journal*. 2001. Vol. 51. No. 3, pp. 279-284.
5. *Intaratep N., Alexander W.N., Devenport W.J., Grace S.M., Dropkin A.* experimental study of quadcopter acoustics and performance at static thrust conditions // *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. 2016. AIAA Paper No. 2016-2873, 14 p.
6. *Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Макашов С.Ю., Аникин В.А., Громов В.В.* Об определении акустических характеристик моделей несущих вертолетных винтов на открытом стенде // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62. № 6. С. 725-730.
7. *Самохин В.Ф., Остроухов С.П., Мошков П.А.* Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке // *Труды МАИ*. 2013. № 70. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44459>
8. *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.
9. *Мошков П.А., Беляев И.В., Остриков Н.Н.* Экспериментальное исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата в заглушенной камере АК-2 // *Материалы XI Международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиасалон-2016»*: Сборник тезисов докладов. М.: ЦАГИ. 2016. С. 45.
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://trudymai.ru/published.php?ID=58711>
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. Беспилотные авиационные системы «Птеро». URL: <http://ptero.ru>
13. *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.
14. *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.
15. *Мошков П.А.* Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2015. №4. С. 101-106.
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.
17. *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.
18. *Мошков П.А.* О направленности акустического излучения винтомоторных силовых установок // *Вестник УГАТУ*. 2017. Т. 21. № 1 (75). С. 118-127.
19. *Кочергин А.В., Павлов Г.И., Гармонов С.Ю., Ситников О.Р., Кочергина К.А., Саматова Л.Н., Ахметшина А.И., Егоров А.Е.* Диаграмма направленности шума, излучаемого двигателем внутреннего сгорания неподвижного автомобиля «Камаз» // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. № 16. С. 227-229.
20. *Мошков П.А., Яковлев А.А.* Экспериментальное исследование влияния капотирования двигателя на акустические характеристики авиационной поршневой силовой установки // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2014. №6. С. 271-274.
21. *Мошков П.А.* Эмпирический метод прогноза шума авиационных поршневых двигателей // *Вестник СГАУ*. 2016. Т. 15. №2. С. 152-161.
22. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Интегральная модель шума силовой установки легкого винтового самолета // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 4. С. 36-44.
23. *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.

24. 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.
25. 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.
26. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Методы снижения шума и заметности беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 38-48.
27. 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.
28. Власов Е.В., Самохин В.Ф. Исследование аэродинамического шума планеров // Акустический журнал. 1977. Т. 23. № 4. С. 550-556.
29. Мушин А.Г., Прозоров А.Г., Топоров А.В. Экспериментальное исследование шума обтекания крыла при малых скоростях потока // Акустический журнал. 1992. Т. 38. № 1. С. 108-113.
30. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Беляев И.В. Исследование шума обтекания крупномасштабной модели крыла с механизацией // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 1. С. 95-105.
31. Тихомиров А.В., Иванов М.С., Омелянчук Е.В. Разработка акустического пеленгатора // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74812>

## STUDYING THE “PTERO-G0” UNMANNED FLYING VEHICLE’S ACOUSTIC CHARACTERISTICS IN AK-2 UNECHOIC CHAMBER

Belyaev I.V.<sup>1\*</sup>, Valiev A.V.<sup>2\*\*</sup>, Moshkov P.A.<sup>3\*\*\*</sup>, Ostrikov N.N.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky,  
TsAGI, 1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia

<sup>2</sup> АФМ-Servers,

20, Zorge str., Moscow, 125252, Russia

<sup>3</sup> Company «Sukhoi civil aircraft»,

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

\* e-mail: [aeroacoustics@mksagi.ru](mailto:aeroacoustics@mksagi.ru)

\*\* e-mail: [uav@ptero.ru](mailto:uav@ptero.ru)

\*\*\* e-mail: [moshkov89@bk.ru](mailto:moshkov89@bk.ru)

### Abstract

Recently, more and more attention is paid to the problem of ensuring unmanned flying vehicles (UAV’s) invisibility in various frequency ranges due to the wide application of the systems with small sized UAV’s for solving special assignment tasks. To ensure the UAV’s invisibility in the audible frequency range at the specified distance from the observer in conditions of known terrain of application, the qualitative data on the UAV acoustic characteristics is required.

The experimental study of the small sized UAV’s “Ptero-G0” acoustic characteristics was performed within the framework of the presented work. The UAV’s power plant consisted of a single-cylinder gasoline internal combustion engine (ICE) and a small sized two-blade propeller with the fixed pitch. The acoustic tests were performed in TsAGI unechoic chamber AK-2.

The following main results were obtained as a result of experimental researches.

1. Energy, spectral and spatial characteristics of acoustic fields of a small sized propeller and single-cylinder four-cycle gasoline engine were obtained.

2. The small sized propeller’s diameter effect on UAV’s noise and signature characteristics was studied. Recommendations on acoustic signature reduction of the UAV “Ptero-G0” were elaborated. These recommendations were implemented and accounted for by the “AFM-Servers” company while developing new flying vehicles.

3. It was demonstrated that a cowl mounting on the engine without both vibration and acoustic insulation could lead to significant noise increase of the power plant.

4. The possibility of employing the empirical model while solving the problem of a single-cylinder four-stroke gasoline engine’s noise evaluation was demonstrated.

Within the framework of the subject’s of UAV acoustics development, the authors are planning to proceed this work in the following main trends.

1. Studying the effect of the power plant's noise shielding by the airframe elements on UAV's noise and signature characteristics.

2. Studying the noise caused by the UAV airframe flow-around.

3. Development of semi-empirical model of the small-sized propeller's noise.

4. Implementation of the existing computation methods for audibility and signature boundaries into practice of noise indices evaluation of various UAV's types.

5. Software development for UAV flight trajectories' plotting under known weather and landscape conditions without the ability to detect it both by ear and with acoustic location finder.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, drone, propeller-engine power plant, propeller, aircraft piston engine, drone noise, power plant noise, acoustic test.

## References

1. Moshkov P.A. *Prognozirovanie i snizhenie shuma na mestnosti legkikh vintovykh samoletov* (Prediction and reduction of environmental noise generated by light propeller aircraft). PhD thesis. Moscow, MAI, 2015, 143 p.
2. Kloet N., Watkins S., Clothier R. Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 3-14.
3. Sinibaldi G., Marino L. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV. *Applied Acoustics*, 2013, vol. 74, no. 1, pp. 79-88.
4. Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S. R. Acoustic signature of an unmanned air vehicle exploitation for aircraft localisation and parameter estimation. *Defence Science Journal*, 2001, vol. 51, no. 3, pp. 279-284.
5. Intaratep N., Alexander W. N., Devenport W. J., Grace S. M., Dropkin, A. experimental study of quadcopter acoustics and performance at static thrust conditions. *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. 2016. AIAA Paper, no. 2016-2873, 14 p.
6. Kop'ev V.F., Zaitsev M.Y., Ostrikov N.N., Denisov S.L., Makashov S.Y., Anikin V.A., Gromov V.V. On determining the acoustic properties of main helicopter rotor models on an open test bench. *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 6, pp. 741-746.
7. Samokhin V.F., Ostroukhov S.P., Moshkov P.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 70, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=44459>
8. 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.
9. Moshkov P.A., Belyaev I.V., Ostrikov N.N. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii po amfibiinoi i bezaerodromnoi aviatsii "Gidroaviasalon-2016"*. Sbornik tezisov dokladov. Moscow, TsAGI, 2016, 45 p.
10. Samokhin V.F., Moshkov P.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58711>
11. Samokhin V.F., Moshkov P.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 55-65.
12. *Bespilotnye aviatsionnye sistemy "Ptero"*, available at: <http://ptero.ru>
13. 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.
14. Bazhenova L.A., Semenov A.G. On the influence of the Reynolds number on the intensity of vortex sound flowing around a cylindrical profile. *Acoustical Physics*, 2013, vol. 59, no. 5, pp. 539-547.
15. Moshkov P.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2015, no. 4, pp. 101-106.
16. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 50-61.
17. 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, vol. 45, no. 3-4, pp. 293-327.
18. Moshkov P.A. *Vestnik UGATU*, 2017, vol. 21, no. 1 (75), pp. 118-127.
19. Kochergin A.V., Pavlov G.I., Garmonov S.Yu., Sitnikov O.R., Kochergina K.A., Samatova L.N., Akhmetshina A.I., Egorov A.E. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 16, pp. 227-229.
20. Moshkov P.A., Yakovlev A.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 6, pp. 271-274.
21. Moshkov P.A. *Vestnik SGAU*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 152-161.
22. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 36-44.
23. 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.
24. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik SibGAU*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 154-160.
25. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 3, pp. 25-34.
26. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 24, no. 1, pp. 38-48.
27. Ostrikov N.N., Denisov S.L., Medvedskii A.L. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2016, no. 2 (45), pp. 152-174.
28. Vlasov E.V., Samokhin V. F. *Akusticheskii zhurnal*, 1977, vol. 23, no. 4, pp. 550-556.
29. Munin A.G., Prozorov A.G., Toporov A.V. *Akusticheskii zhurnal*, 1992, vol. 38, no. 1, pp. 108-113.
30. Kopiev V.F., Zaytsev M.Yu., Belyaev I.V. Investigation of airframe noise for a large-scale wing model with high-lift devices. *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 1, pp. 97-107.
31. Tikhomirov A.V., Ivanov M.S., Omel'yanchuk E.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 90, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74812>