

УДК 534.83:629.735.33

## О НАПРАВЛЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВИНТОМОТОРНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

П. А. Мошков

[moshkov89@bk.ru](mailto:moshkov89@bk.ru)

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

*Поступила в редакцию 19.12.2016*

**Аннотация.** Обобщены экспериментальные данные о направленности акустического излучения поршневых силовых установок, применяемых на летательных аппаратах самолетного типа. Акустические испытания легких самолетов Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890, МАИ-890У и F30 были выполнены на аэродроме Московского авиационного института. Также были выполнены акустические испытания малоразмерного беспилотного летательного аппарата с поршневым двигателем в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Показано, что при работе силовой установки на взлетном режиме в задней полусфере в направлениях  $105\text{--}120^\circ$  в суммарном шуме силовой установки доминирует излучение на частоте первой гармоники шума вращения винта. На оси коленвала доминирующим является акустическое излучение от поршневого двигателя. Получены факторы направленности суммарного акустического излучения силовой установки и отдельных его составляющих, которые будут использоваться при расчете шума, создаваемого на местности легкими самолетами и малоразмерными беспилотными летательными аппаратами.

**Ключевые слова:** шум силовой установки; шум воздушного винта; шум авиационного двигателя; диаграмма направленности; аэроакустика; шум легких самолетов; шум беспилотных летательных аппаратов.

### ВВЕДЕНИЕ

Характеристика направленности – одна из важнейших характеристик источников шума в авиации. Факторы направленности излучения различных источников используются в классических подходах авиационной акустики для расчета ожидаемых уровней шума самолетов на местности [1–4]. Эти методы расчета также входят в методику прогноза границ слышимости и заметности малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с винтомоторной силовой установкой (СУ) [5]. В тоже время, как правило, в данных алгоритмах заложены обобщенные осредненные факторы направленности суммарного излучения или отдельных его составляющих полученные по результатам исследования большого количества летательных аппаратов. При этом для улучшения точности прогноза необходимо более детальное изучение характеристик направленности отдельных составляющих излучения в части влияния режима работы и конструктивных особенностей силовых установок. Данная работа объединяет отдельные исследования акустических характери-

стик легкомоторных самолетов [5–12] и БПЛА [13, 14], выполненные автором ранее, в части изучения характеристик направленности суммарного излучения силовых установок и отдельных его составляющих.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

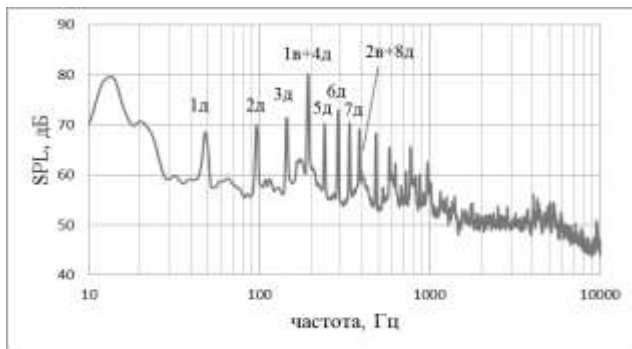
Акустические испытания легкомоторных самолетов были выполнены на аэродроме Московского авиационного института. При этом были выполнены измерения акустических характеристик самолетов Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890, МАИ-890У и F30 в статических условиях. Измерительные точки располагались на дуге окружности радиусом 30 метров, центр которой совпадал с проекцией втулки винта на земную поверхность, а направление  $0^\circ$  соответствовало излучению в переднюю полусферу по оси воздушного винта. Отметим, что при проведении акустических испытаний уровень природного фона был существенно ниже

уровня шума ЛА во всем измеряемом диапазоне частот [15].

Также были выполнены акустические испытания малоразмерного БПЛА с поршневым двигателем в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. При этом измерительные точки были расположены на уровне оси воздушного винта в диапазоне азимутальных углов 30–135°.

Разделение акустических полей воздушного винта и поршневого двигателя осуществлялось на основании анализа узкополосных спектров уровней звукового давления. 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 малоразмерного БПЛА в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Силовая установка БПЛА включала 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)

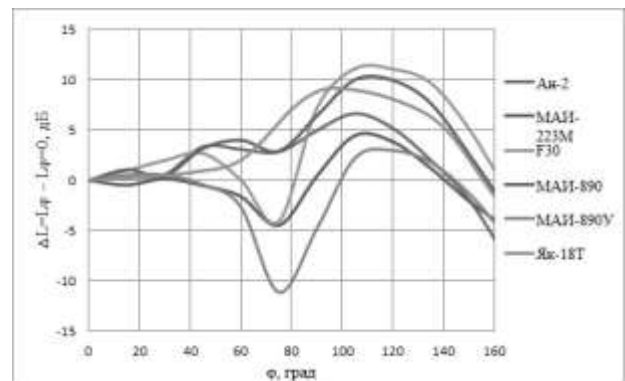
### НАПРАВЛЕННОСТЬ ШУМА ВОЗДУШНОГО ВИНТА

**Направленность тональных составляющих.** Было установлено, что при крейсерских и взлетных режимах работы непосредственно изменение частоты вращения не приводит к качественному изменению характеристик направ-

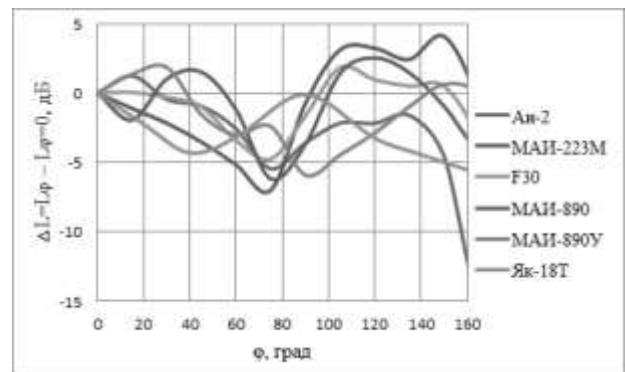
ленности излучения на первых двух гармониках частоты следования лопастей воздушного винта. На рис. 2 и 3 представлены характеристики направленности излучения на частоте первой и второй гармоник шума вращения винта для различных винтов, устанавливаемых на самолетах: Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890, МАИ-890У и F30. Представленные на рис. 2, 3 характеристики являются нормализованными и получены согласно:

$$\Delta L = L_\varphi - L_{\varphi=0},$$

где  $L_\varphi$  – уровень звукового давления соответствующий азимутальному углу  $\varphi$ ,  $L_{\varphi=0}$  – уровень звукового давления соответствующий направлению  $\varphi=0^\circ$ .



**Рис. 2.** Нормализованные характеристики направленности излучения на частоте 1-й гармоники шума вращения винта



**Рис. 3.** Нормализованные характеристики направленности излучения на частоте 2-й гармоники шума вращения винта

Максимальные уровни шума на частоте 1-й гармоники шума вращения винта имеют место в задней полусфере в направлениях 90–120°. Излучение на частоте второй гармоники шума вращения винта имеет сложную направленность по пространству. Среди всех кривых на графике выделяется направленность излучения второй гармоники для СУ самолета Як-18Т. Вероятнее

все, это связано с тем, что вторая гармоника шума винта совпадает с 8-й цилиндровой гармоникой шума двигателя М-14П, и в среднем для рассматриваемых режимов излучение от двигателя определяет направленность излучения на рассматриваемой частоте.

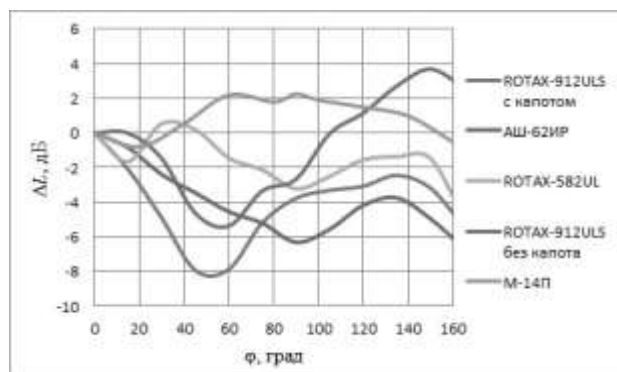
Можно видеть, что конструктивные особенности и, как следствие, различие в аэродинамических характеристиках винтов, существенным образом влияет на характеристики направленности тонального излучения. При оценке шума проектируемого ЛА на местности необходимо выбирать факторы направленности винтов наиболее близких по безразмерным геометрическим и аэродинамическим характеристикам к винтам, имеющимся в базе данных.

Отметим, что представленные характеристики направленности первых двух гармоник шума вращения винта соответствуют источникам дипольного типа. Данный факт свидетельствует о доминирующей роли шума от аэродинамической нагрузки в тональных составляющих шума винта. Шум вытеснения, по видимому, не определяет направленность излучения шума винта на первых двух гармониках частоты следования лопастей воздушного винта при работе винта в статических условиях.

#### НАПРАВЛЕННОСТЬ ШУМА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Направленность акустического излучения поршневых двигателей определяется конструктивными особенностями, особенностями организации рабочего процесса, а также режимом работы двигателя.

На рис. 4 показаны осредненные по шести режимам работы нормализованные характеристики направленности поршневых двигателей, характерных для малой авиации.



**Рис. 4.** Нормализованные характеристики направленности суммарного гармонического излучения авиационных двигателей М-14П, АШ-62ИР, ROTAX-582UL, ROTAX-912ULS (с капотом и без)

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

Максимумы характеристик направленности излучения двигателей АШ-62ИР и ROTAX-912ULS соответствуют азимутальным углам  $0^\circ$  — в передней полусфере и  $135\text{--}150^\circ$  — 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  $60\text{--}120^\circ$ . 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-ти цилиндровых двигателей воздушного охлаждения АШ-62ИР и М-14П обусловлено:

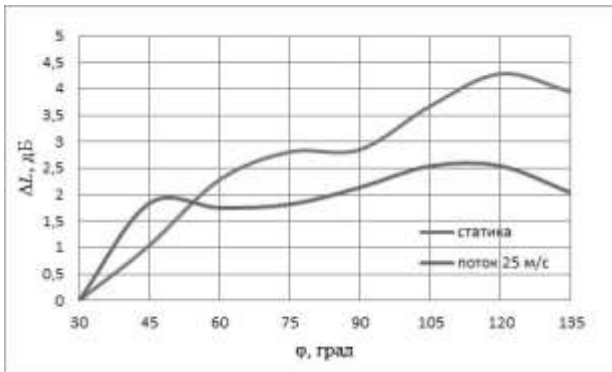
- различием в способах организации выхлопа;
- наличием у двигателя М-14П помимо капота дополнительных управляемых жалюзи, устанавливаемых для улучшения охлаждения цилиндров двигателя при полете. В тоже время жалюзи могут влиять на энергетические и пространственные характеристики структурного шума, распространяющегося через корпус двигателя.

**Направленность шума одноцилиндрового двигателя с низкоэффективным глушителем шума выхлопа.** На рис. 5 представлены характеристики направленности суммарного тонального шума одноцилиндрового двигателя при гонке СУ БПЛА в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ.

Измерения выполнялись как при гонке в статических условиях, так и при наличии набегающего потока. Характерные максимумы излучения наблюдаются в направлении выхлопа двигателя ( $110\text{--}120^\circ$ ) в задней полусфере.

В абсолютных величинах уровень шума двигателя при наличии потока несколько ниже (на 1–2 дБ), чем в статических условия. В статических условиях развивается максимальная тяга, но тяговая мощность воздушного винта при этом равна нулю. Несмотря на равенство

частот вращения коленвала, двигатель работает по различным частично скоростным характеристикам. При наличии потока двигатель является менее нагруженным, что и приводит к снижению интенсивности излучения и изменению характеристики направленности. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости выполнения дополнительных исследований с измерениями характеристик двигателя.



**Рис. 5.** Нормализованные характеристики направленности излучения одноцилиндрового двигателя в полетных и в статических условиях (частота вращения коленвала 5400 об/мин)

Отметим, что на двигателе был установлен винт неизменяемого шага, если бы устанавливался автоматический изменяемого шага, то данного эффекта скорее всего не было бы.

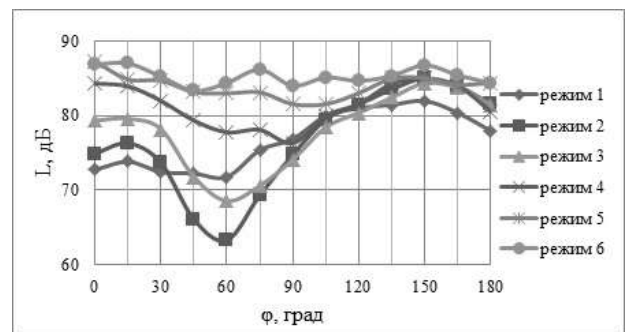
**Влияние капотирования на направленность акустического излучения поршневых двигателей.** Рассмотрим на примере двигателя ROTAX-912ULS влияние капотирования на характеристики направленности шума поршневого двигателя. Характеристики получены при измерениях акустических характеристик самолетов МАИ-223М (двигатель заключен в капот) и МАИ-890У (двигатель без капота). Испытания были выполнены для шести режимов работы СУ при этом номинальная частота вращения коленвала изменялась от 4000 до 5000 об/мин с шагом 200 об/мин.

Можно видеть, что при отсутствии капота (рис. 6) при повышенных режимах работы СУ (режимы 5 и 6) излучение основного тона двигателя происходит относительно равномерно по пространству. В то же время при пониженных режимах работы (режимы 1–3) наблюдаются два характерных максимума в передней полусфере в направлении 15° и в задней полусфере в направлении 150°.

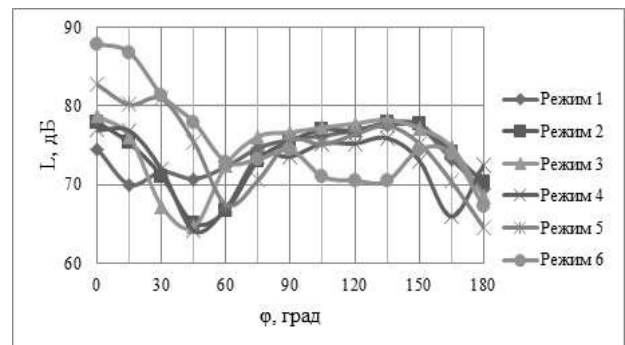
В тоже время для случая закапотированного двигателя максимумы характеристики направ-

ленности в передней полусфере соответствуют азимутальному углу 0° и углам 135–150° в задней полусфере (рис. 7).

Существенное отличие в характеристике направленности двигателя, заключенного в капот (рис. 7), от случая двигателя без капота (рис. 6) свидетельствует о том, что существенная часть акустической энергии распространяется через корпус двигателя и, особенно, при повышенных режимах работы. Это объясняется тем, что глушитель шума выхлопа подбирается, как правило, для эффективной работы на повышенных режимах.



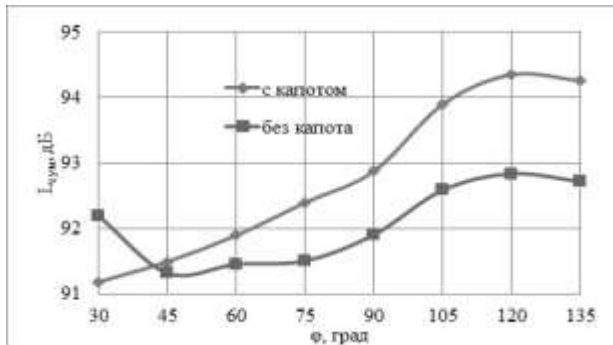
**Рис. 6.** Влияние режима работы на характеристику направленности основного тона двигателя. Самолет «МАИ-890У», двигатель «ROTAX-912ULS» без капота



**Рис. 7.** Влияние режима работы на характеристику направленности основного тона двигателя. Самолет «МАИ-223М», двигатель «ROTAX-912ULS» заключен в капот

Акустические испытания малоразмерного БПЛА с поршневым двигателем показали, что наличие капота без системы вибро- и звукоизоляции может существенным образом увеличивать интенсивность шума поршневой силовой установки. На рис. 8 показано сравнение суммарных уровней звукового давления (20–10000 Гц), измеренных при гонке СУ в статических условиях с капотом и без него.

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

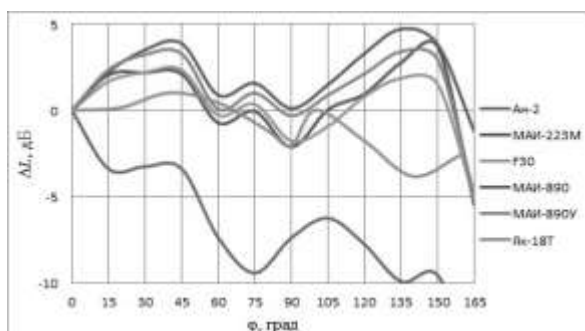


**Рис. 8.** Влияние капота на характеристику направленности суммарного излучения СУ БПЛА (частота вращения коленвала 5400 об/мин, статические условия, расстояние – 2 метра)

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

#### НАПРАВЛЕННОСТЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА СУ

На рис. 9 представлены нормализованные диаграммы направленности высокочастотного (1000–5000 Гц) непрерывного по спектру излучения винтомоторных СУ.



**Рис. 9.** Нормализованные характеристики направленности высокочастотного (1000–5000 Гц) широкополосного излучения винтомоторных СУ

Сложная пространственная форма характеристики направленности указывает на наличие разных источников, важнейшими из которых

являются: вихревая пелена за винтом (шум задней кромки) и ее взаимодействие с системой воздушного охлаждения двигателя, широкополосная составляющая шума от неустановившейся аэродинамической нагрузки винта, вихревая составляющая шума впуска и выхлопа двигателя, а также высокочастотная составляющая структурного шума двигателя.

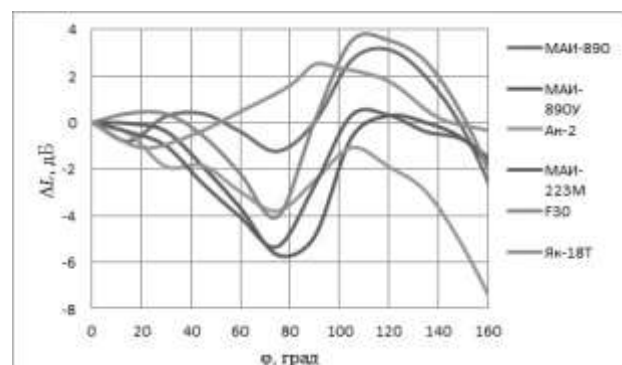
Вероятнее всего, для СУ самолета Ан-2 характерные максимумы в направлениях 0 и 150° определяются излучением поршневого двигателя, а в направлениях 45 и 105° излучением воздушного винта. Максимумы широкополосного высокочастотного излучения СУ самолета Як-18Т имеют место в направлениях 45 и 100° и, скорее всего, определяются вихревой составляющей шума воздушного винта.

Интересна согласованность диаграмм направленности непрерывного по спектру излучения СУ самолетов МАИ-223, МАИ-890, МАИ-890У и F30. Здесь вероятнее всего в направлении 75° доминирует шум поршневого двигателя, а в направлениях ~45 и ~135° излучение от воздушного винта.

#### НАПРАВЛЕННОСТЬ СУММАРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВИНТОМОТОРНОЙ СУ

При оценке шума БПЛА с силовыми установками, которые ранее были исследованы на других летательных аппаратах, можно использовать при расчете ожидаемых уровней шума факторы направленности суммарного излучения, но с учетом влияния режима работы.

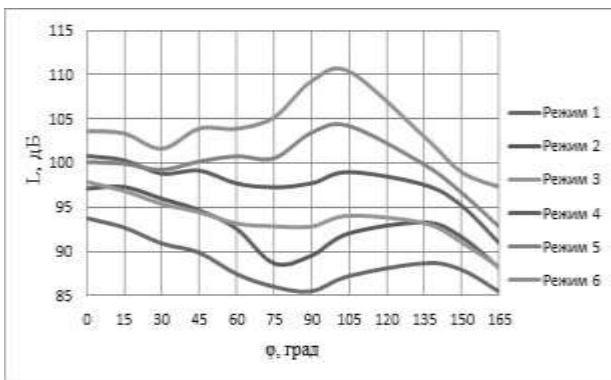
На рис. 10 представлены нормализованные характеристики направленности суммарного излучения силовых установок самолетов: Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890, МАИ-890У и F30. Характерные максимумы в задней полушфере обусловлены излучением винта на частотах, кратных частоте следования лопастей.



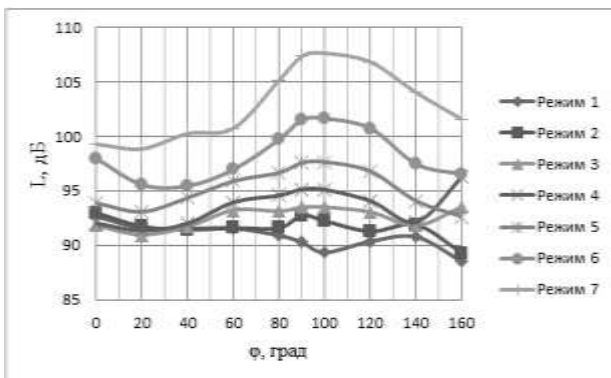
**Рис. 10.** Нормализованные характеристики направленности суммарного излучения силовых установок самолетов Ан-2, Як-18Т, МАИ-223М, МАИ-890, МАИ-890У и F30

**Влияние режима работы.** Режим работы влияет на соотношение вклада основных источников в суммарный шум СУ [9]. В частности, при повышенных режимах работы СУ самолета Ан-2 роль шума винта существенно увеличивается и до 94% акустической энергии сосредоточено на первой гармонике частоты следования лопастей винта. Поэтому характеристика направленности суммарного излучения при повышенных режимах работы определяется излучением воздушного винта. В тоже время на крейсерских режимах вклад двигателя соизмерим с вкладом воздушного винта в суммарную звуковую мощность СУ. И направленность суммарного излучения определяется излучением от винта и от двигателя.

На рис. 11 и 12 представлены характеристики направленности суммарного излучения винтомоторных СУ самолетов Ан-2 и Як-18Т, соответственно.



**Рис. 11.** Влияние режима работы на характеристику направленности суммарного излучения СУ самолета Ан-2 (на расстоянии 30 метров)



**Рис. 12.** Влияние режима работы на характеристику направленности суммарного излучения СУ самолета Як-18Т (на расстоянии 30 метров)

Анализируя данные рис. 2–4, 11, 12 можно прийти к выводу о том, что в суммарном шуме рассматриваемых СУ в передней полусфере в направлении 0° доминирует излучение поршне-

вого двигателя. В задней полусфере доминирует излучение воздушного винта в направлении 105–120° для СУ самолета Ан-2 и 90–100° для СУ самолета Як-18Т.

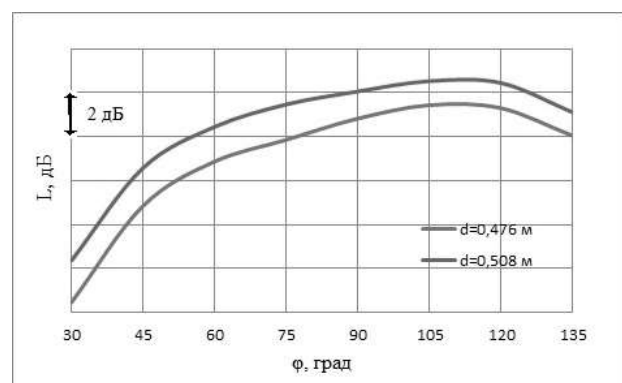
### ОСОБЕННОСТИ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ВИНТОВ

Известно, что на аэродинамические характеристики воздушных винтов и, как следствие, на акустические, существенным образом влияет режим обтекания лопасти, определяемый числом Рейнольдса. Автомодельными считаются режимы работы винта при числах Рейнольдса свыше  $10^6$ . В тоже время малоразмерные воздушные винты, которые широко используются в беспилотной авиации в качестве движителей, работают при существенно меньших числах Рейнольдса. И поэтому при оценке шума на местности таких БПЛА необходимо учитывать особенности направленности излучения малоразмерных воздушных винтов.

На рис. 13 представлены характеристики направленности излучения на частоте первой гармоники шума вращения винта, полученные по результатам натурных испытаний малоразмерного БПЛА с винтами различных диаметров.

Можно видеть существенное отличие характеристик направленности 1-й гармоники шума вращения винтов, работающих при низких числах Рейнольдса ( $2 \cdot 10^5$ ) от винтов, работающих на режиме автомодельности (см. рис. 2), хотя максимальные уровни также наблюдаются в задней полусфере в направлении углов 105–120°.

Интересен тот факт, что незначительное уменьшение диаметра малоразмерного винта приводит к снижению шума, также как и в случае винтов, работающих на режиме автомодельности [16, 17].



**Рис. 13.** Характеристики направленности 1-й гармоники шума вращения малоразмерных винтов при измерениях в АК-2 ЦАГИ (частота вращения винта – 5760 об/мин, скорость набегающего потока – 30 м/с)

В работе [18] минимальные уровни первых двух гармоник шума вращения малоразмерного винта наблюдаются в направлении  $90^\circ$ . Максимальные уровни шума первых двух гармоник соответствуют азимутальным углам  $50$  и  $120^\circ$ . При этом измерения выполнялись в диапазоне углов  $50$ – $120^\circ$ , и возможно, что при увеличении диапазона измерений произошло бы смещение максимальных уровней шума. Широкополосное излучение происходит относительно равномерно по пространству.

В тоже время представленные результаты свидетельствуют о необходимости создания базы данных об акустических характеристиках малоразмерных винтов.

На данный момент слишком мало опубликовано в открытой печати экспериментальных данных об энергетических и пространственных характеристиках акустических полей малоразмерных воздушных винтов. Данный факт не позволяет сделать окончательный вывод о влиянии режима обтекания лопастей винта на диаграмму направленности излучения.

#### ОСОБЕННОСТИ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВИНТОКОЛЬЦЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ (ВКД)

На основании опубликованных работ можно сделать следующие выводы об особенностях направленности излучения винтокольцевых движителей.

В работах [19, 20] в результате численного моделирования шума ВКД были получены характеристики направленности суммарного акустического излучения. Максимумы имеют место в передней полусфере в направлении  $70$ – $80^\circ$  и в задней полусфере в направлении  $130^\circ$ , причем максимум в передней полусфере определяет суммарную звуковую мощность ВКД.

В работе [21] было выполнено исследование модели БПЛА с поршневым двигателем. Для серии экспериментов винт заключался в кожух. Максимумы излучения на частоте первой гармоники шума вращения винта без кольца имели место в передней и задней полусферах в направлениях  $30^\circ$  и  $135^\circ$ , соответственно. Установка кольца привела к смещению пиков в диаграмме направленности до азимутальных углов  $45$  и  $150^\circ$ .

В целом можно отметить, что наличие кольца приводит к смещению максимумов в задней полусфере, что может быть связано с экранированием шума винта кольцевым обтекателем.

В тоже время изучение характеристик направленности шума ВКД требует выполнения

специальных качественных экспериментов с целью сравнения акустических характеристик винта в кольце и без кольца при условии равенства тяг. При этом частота вращения винта в кольце будет ниже, чем того же самого винта без кольца. Существенное влияние на акустические характеристики винта также оказывает способ крепления кольца. Наличие пилонов приводит к появлению дополнительного источника, связанного с взаимодействием «винт-пилон».

#### ПЕРЕХОД ОТ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ К ФАКТОРУ НАПРАВЛЕННОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМОМУ В РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЯХ

Фактор направленности ( $10lg\Phi$ ) определяется как разность между уровнями звуковых давлений исследуемого источника в некоторой точке ( $L_{изм}$ ) и фиктивного ненаправленного источника той же мощности. Для рассматриваемых в работе силовых установок определять значения  $10lg\Phi$  в зависимости от направления распространения звука можно согласно следующему соотношению [5]:

$$10lg\Phi = L_{изм} - 10lg \frac{W}{2\pi R^2 W_0} = L_{изм} - L_W + 20lgR - 8, \text{ дБ},$$

где  $R$  – расстояние от источника до точки наблюдения (м),  $W_0$  – пороговое значение акустической мощности ( $10^{-12}$  Вт),  $W$  – звуковая мощность источника (Вт),  $L_W$  – уровень звуковой мощности (дБ).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы характеристики направленности суммарного излучения винтомоторных силовых установок и отдельных его составляющих. Полученные в работе диаграммы направленности не противоречат результатам численных и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов [21–26].

Максимумы характеристики направленности суммарного излучения винтомоторных СУ имеют место в задней полусфере в направлении  $105$ – $120^\circ$ , что обусловлено излучением винта на гармониках частоты следования лопастей.

Исследовано влияние режима обтекания лопастей винтов при низких числах Рейнольдса ( $2 \cdot 10^5$ ) на пространственную структуру акустического поля. Изучено влияние капотирования двигателей на характеристику направленности акустического излучения. На основании доступных публикаций рассмотрено влияние кольцевого обтекателя на шум воздушного винта.

Следующим этапом работ будет учет полученных характеристик направленности в рамках традиционной методики расчета шума винтомоторных СУ в дальнем поле [1–4]. А также исследование влияния экранирования шума винтомоторной силовой установки на характеристики направленности суммарного излучения и отдельных его составляющих [27] и учет этого эффекта при расчете шума БПЛА на местности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 85, no. 5, pp. 1157–1166, 2012.]
2. 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. *TsAGI Science Journal*, vol. 45, no. 3–4, pp. 367–388, 2014.]
3. 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. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin. Integral noise model of the power plant by the light propeller aircraft. in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 23, no. 4, pp. 36–44, 2016.]
4. Мошков П. А. Эмпирический метод прогноза шума авиационных поршневых двигателей // Вестник СГАУ. 2016. Т. 15. № 2. С. 152–161. [P. A. Moshkov. The empirical method of prediction of aircraft piston engines noise, in *Vestnik SSAU*, vol. 15, no. 2, pp. 152–161, 2016.]
5. Мошков П. А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ (НИУ), 2015. 143 с. [P. A. Moshkov. *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.]
6. 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](http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin_moshkov_rus.pdf) (дата публикации 26.06.2015). [V. F. Samokhin and P. A. Moshkov. Experimental study of the acoustic characteristics of the power plant of the aircraft "An-2" in static conditions, in *Trudy MAI*, no. 82, 2015. Available: [http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin\\_moshkov\\_rus.pdf](http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin_moshkov_rus.pdf) (accessed 26.06.2015).]
7. 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 *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, no. 6, pp. 265–270, 2014.]
8. 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 *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, no. 4, pp. 101–106, 2015.]
9. 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 *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 23, no. 2, pp. 50–61, 2016.]
10. 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. [P. A. Moshkov and A. A. Yakovlev. Experimental study of the influence of the engine nosing on the acoustic characteristics of aviation piston power plant, in *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, no. 6, pp. 271–274, 2014.]
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. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin. The study of acoustic characteristics by the light propeller aircraft "Wilga 35A" to level flight modes. in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 21, no. 2, pp. 55–65, 2014.]
12. 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-dvigatелем-vnutrennego-sgoraniya.pdf> (дата публикации 30.06.2012). [V. F. Samokhin and P. A. Moshkov. Acoustic characteristics of a light propeller aircraft with internal combustion engine, in *Trudy MAI*, no. 57, 2012 Available: <http://mai.ru/upload/iblock/8dd/akusticheskie-kharakteristiki-legkogo-vintovogo-samoleta-s-dvigatелем-vnutrennego-sgoraniya.pdf> (accessed 30.06.2012)]
13. 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://mai.ru/upload/iblock/81d/81d77168791775d9fa57060f4d4612d5.pdf> (дата публикации 25.11.2013). [V. F. Samokhin, S. P. Ostroukhov and P. A. Moshkov. Experimental study of noise sources unmanned aerial vehicle with ducted propeller in pushing arrangement. in *Trudy MAI*, no. 70. Available: <http://mai.ru/upload/iblock/81d/81d77168791775d9fa57060f4d4612d5.pdf> (accessed 25.11.2013).]
14. Мошков П. А., Беляев И. В., Остриков Н. Н. Экспериментальное исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата в заглушенной камере АК-2. // XI Международная научная конференция по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиасалон-2016», г. Геленджик, 23–24 сентября 2016, Тез. Докл. М.: ЦАГИ, 2016, С. 45. [P. A. Moshkov, I. V. Belyaev and N. N. Ostrikov. "Experimental study of the acoustic characteristics of the unmanned aerial vehicle in an anechoic chamber AK-2.", (in Russian), in *XI International scientific conference on amphibious and airfield free basing aviation* (Gidroaviasalon - 2016), Gelendzhik, Russia, 2016, p. 45.]



15. **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. Ambient background noise during acoustic testing of aircraft at the airfield of small aircraft based. in *Science and Education of the Bauman. MSTU*, no. 7, 2015 Available: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (accessed 25.07.2015).]
16. **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 the power plant light aircraft. in *Vestnik SibGAU*, vol. 17, no. 1, pp 154–160, 2016.]
17. **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 *Vestnik Samarskogo universiteta. Aero-kosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, vol. 15, no. 3, pp 25–34, 2016.]
18. **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. [N. N. Ostrikov, S. L. Denisov and A. L. Medvedsky. Experimental study of the effect of shielding aircraft noise sources on small-scale models. in *Vestnik PNIPIU. Aero-kosmicheskaya tekhnika*. no. 2(45), pp 152–174, 2016.]
19. **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. [I. V. Abalakin, P. A. Bakhvalov, V. G. Bobkov, T. K. Kozubskaya and V. A. Anikin. Numerical simulation of aerodynamic and acoustic characteristics of the ducted propeller, in *Matematicheskoe modelirovanie*, vol. 27, no. 10, pp 124–144, 2015.]
20. **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. [I. V. Abalakin, V. A. Anikin, P. A. Bakhvalov, V. G. Bobkov and T. K. Kozubskaya. Numerical study of aerodynamic and acoustic properties of ducted propeller. in *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, no.3, pp. 130–145, 2016.]
21. **Oleson R.D., Patrick H.** Small aircraft propeller noise with ducted propeller // *AIAA Paper*. 1998. №. 98–2284, pp. 464–472.
22. **Hanson D.B., Parzych D.J.** Theory for noise of propellers in angular inflow with parametric studies and experimental verification // *NASA Contractor Report*. 1993. № 4499, 108 p.
23. **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. *TsAGI Science Journal*, vol. 45, no. 3–4, pp. 293–327, 2014.]
24. **Moussa K.** Computational modelling of propeller noise: NASA SR-7A propeller.// A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of master of applied science in mechanical engineering. 2014. 92 p.
25. **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. [A. V. Kochergin, G. I. Pavlov, S. Yu. Garmonov, O. R. Sitnikov, K.A. Kochergina, L. N. Samatova, A. I. Akhmetshina and A. E. Egorov. Diagram directivity noise emitted by an internal combustion engine "Kamaz" stationary car, in *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, Vol. 15, No. 16, pp. 227–229.]
26. **Кочергин А. В., Павлов Г. И., Гармонов С. Ю., Ситников О. Р., Кочергина К. А., Саматова Л. Н., Ахметшина А.И., Егоров А.Е.** Параметры акустического поля, создаваемого узлами и механизмами движущегося автомобиля «Камаз» // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 16. С. 233–235. [A. V. Kochergin, G. I. Pavlov, S. Yu. Garmonov, O. R. Sitnikov, K. A. Kochergina, L. N. Samatova, A. I. Akhmetshina and A. E. Egorov. Parameters of the acoustic field generated the moving the nodes and mechanisms "Kamaz" car, in *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, Vol. 15, No. 16, pp. 233–235.]
27. **Delfs J.W.** Simulation of aircraft installation noise – a key to low noise aircraft design // Computational experiment in aeroacoustics. CEAA-2016. Svetlogorsk, Kaliningrad region, Russia, September 21–24, 2016. Book of abstracts. Moscow. Keldysh Institute. 2016. pp. 7–11.

#### ОБ АВТОРЕ

**МОШКОВ Петр Александрович**, инж.-конструктор 1-й кат. Дипл. инж. (МАИ, 2012). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (МАИ, 2015). Иссл. в обл. аэроакустики авиационных силовых установок, акустической усталости авиационных конструкций.

**METADATA**

**Title:** About the direction of acoustic radiation of propeller power plant.

**Authors:** P. A. Moshkov

**Affiliation:**

Sukhoi Civil Aircraft, Russia.

**Email:** moshkov89@bk.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 1 (75), pp. 118-127, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper summarizes the experimental data on the acoustic radiation pattern piston power plants, used on aircraft such as airplane. Acoustic testing of light aircraft An-2, Yak-18T, MAI-223M, MAI-890, MAI-890U and F30 were performed at the aerodrome of the Moscow Aviation Institute. There have also been carried out acoustic testing small-size unmanned aircraft with piston engine in an anechoic chamber AK-2 TsAGI. It is shown that when the of the power plant on the takeoff in the rear hemisphere in the areas of 105-120 ° in the total noise of the power plant is dominated by radiation at a frequency of rotation of the first propeller noise harmonics. On the crankshaft axis is dominant acoustic radiation from the piston engine. Factors obtained the total directivity of acoustic radiation of power plant and its separate components, which will be used in the calculation of community noise of light aircraft and small-sized unmanned aerial vehicles.

**Key words:** power plant noise; propeller noise; aviation engine noise; directivity pattern; aeroacoustics; light aircraft noise; unmanned aerial vehicles noise.

**About authors:**

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