

doi: 10.32620/oikit.2020.88.05

УДК 629.7.014-519:534:621.432

В.В.Руденко, И.В. Калужин, Н.А. Андрущенко

Акустическая заметность беспилотных летательных аппаратов с силовыми установками на базе поршневых двигателей

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

Наличие в эксплуатации множества прототипов БПЛА с винтовыми движителями, применение таких аппаратов на относительно низких высотах и скоростях полета делает актуальной проблему снижения шума от БПЛА с точки зрения, как акустической заметности, так и экологии. Цель работы – определение комплекса методов, способствующих снижению заметности БПЛА в акустическом диапазоне. Показано, что основным источником шума от БПЛА на местности является силовая установка, в состав которой входят двигатель и винтовой движитель. Исследованы параметры силовых установок, влияющие на процессы, определяющие акустическую заметность БПЛА. Проведен комплексный анализ факторов, влияющих на заметность. В состав силовых установок входят двухтактный и четырёхтактный двигатели внутреннего сгорания и двухлопастные воздушные винты. Рассмотрено применение глушителей шума на выхлопе ДВС. Получены спектральные характеристики акустических полей винтомоторных силовых установок для действующего образца БПЛА «Эко». Измерения проводились в третьоктавных и 1/48 октавных полосах частот в статических условиях. Место проведения – аэродром ХАИ. Отметим, что воздушные винты, входившие в состав силовых установок, работали при числах Рейнольдса ($Re_{0,75} < 2 \cdot 10^5$), что существенным образом может влиять на его аэродинамические и акустические характеристики. Показано, что при выборе СУ БПЛА следует учитывать то, что двухтактные поршневые двигатели являются доминирующим источником в шуме винтомоторных СУ при отсутствии капота и глушителей в трактах впуска и выхлопа. Применение четырёхтактного ДВС значительно уменьшает шум СУ. В общем случае положение границ зоны акустической заметности БПЛА в месте расположения наблюдателя определяется соотношением между интенсивностью воспринимаемого наблюдателем акустического излучения от БПЛА и интенсивностью звука, соответствующего природному акустическому фону, и зависит от степени проявления акустических эффектов, сопровождающих распространение звука в турбулентной атмосфере – рефракции звуковых волн, поглощения и рассеивания акустической энергии. Проведен расчёт и сравнение дальности обнаружения БПЛА с учётом существующих природных маскеров. Представлены результаты экспериментальных исследований, позволяющие оценить степень акустической заметности БПЛА. Определён комплекс мер, направленных на уменьшение интенсивности акустической заметности БПЛА в различных областях спектра излучения.

Ключевые слова: воздушный винт, четырёхтактный двигатель, амплитудно-частотная характеристика, диаграмма направленности, уровень, шум вращения.

1. Источники шума на местности от беспилотных летательных аппаратов с винтовыми движителями. Объект исследований. Методика проведения акустических испытаний и обработки измерений

Основным источником акустического излучения от БПЛА является его силовая установка (СУ). Если суммировать все составляющие акустического излучения $W_{СУ}$ винтомоторной силовой установки БПЛА, получим уравнение акустического баланса

$$W_{CY} = W_{\text{вв}} + W_{\text{нд}} + W_{\text{агр}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{вв}}$ – акустическая энергия, излучаемая воздушным винтом;
 $W_{\text{нд}}$ – акустическая энергия, излучаемая поршневым двигателем;
 $W_{\text{агр}}$ – акустическая энергия, излучаемая агрегатами.
Объект исследований – БПЛА «Эко» (рис. 1).



Рис.1. БПЛА «Эко». Аэродром ХАИ

Сравнивали акустические характеристики БПЛА «Эко» с силовыми установками двух комплектаций (рис. 2, а, б). Испытания проводили в статических условиях.

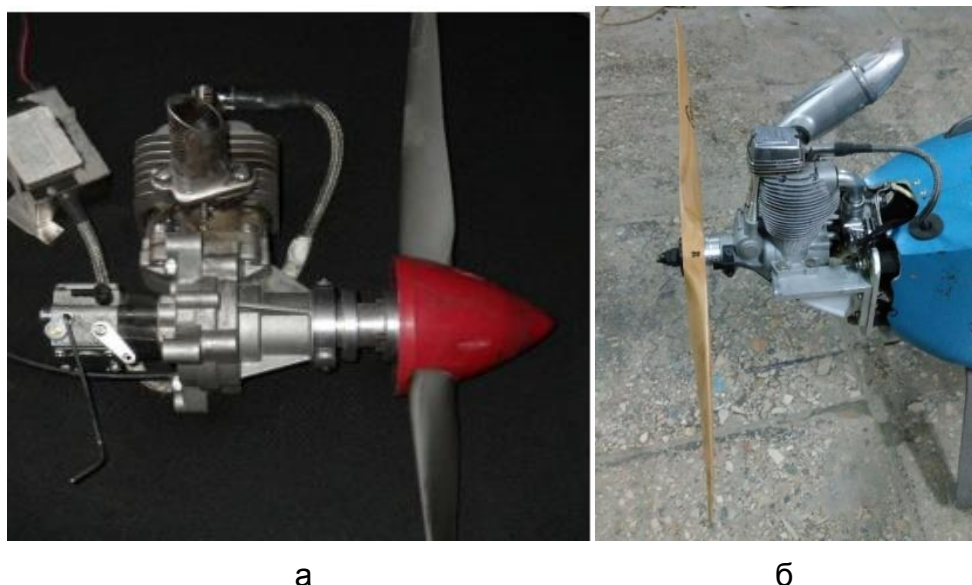


Рис.2. Силовая установка БПЛА «Эко»: а – с одноцилиндровым двухтактным поршневым двигателем DLE-30 и воздушным винтом 18×10";
б – с одноцилиндровым четырёхтактным поршневым двигателем O.S.GF 30 «Saeto» и воздушным винтом 17×8" R-DFDL Propellers.

Параметры СУ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры СУ

Поршневой двигатель	DLE-30, двухтактный ДВС	O.S.GF 30 «Saeto», четырёхтактный ДВС
Мощность двигателя	3,7 л.с. (8500 об/ мин)	2,76 л.с.(9000 об/ мин)
Обороты холостого хода	1600 об/ мин	1800 об/ мин
Статическая тяга	7,5 кг/ высота 1800 м	-
Объём цилиндра	30,5 см ³	29,94 см ³
Диаметр×ход поршня	36 мм×30 мм	38 мм×26,4 мм
Выход выхлопных газов	Конфузор длиной 70 мм, диаметром на срезе 20 мм	Труба длиной 67 мм, диаметром 12 мм
Воздушный винт	18×10"	17×8"

Система выхлопа двигателей организована таким образом, что выхлопные газы выбрасываются через один выхлопной патрубок с левой стороны (по направлению полёта). В свою очередь, измерительный микрофон проходил область с этой же стороны. Измерения проводили без глушителей на выхлопной трубе двигателя и с глушителями.

При испытаниях частота вращения коленвала двигателя изменялась в пределах 5000...5500 об/мин.

Во время испытаний измеряли звуковое давление в 19 точках акустического поля, расположенных на дуге окружности радиусом 15 м, с шагом 10° (рис. 3). Высота над подстилающей, асфальтированной поверхностью для осей микрофона и винта $h = 1,5$ м. Измерения проводили одним микрофоном. Угловое положение выбирали поворотом БПЛА вокруг вертикальной оси. Центр поворота совпадал с проекцией втулки винта на земную поверхность. Измерительные точки располагали на горизонтальной плоскости. Направление 0° соответствовало излучению в заднюю полусферу винта. Направление 90° соответствовало направлению излучения в плоскости диска винта. Такая схема проведения измерений позволяет избежать влияния градиента ветра на микрофон и не противоречит международным стандартам [1].

Для проведения измерений использовали аппаратуру RFT в составе: 1/3-октавный анализатор 01024, микрофон МК 102. Звуковая карта ПК – Tascan US 322. Частота дискретизации – 48 кГц, 24 бита.

Обработка измеренного звукового давления включала в себя получение третьооктавных спектров звукового давления и 1/48 октавных спектров интенсивности излучения шума в диапазоне частот 20...20000 Гц по линейной характеристике С.

Фиксировали атмосферное давление, влажность, температуру воздуха, скорость и направление ветра.

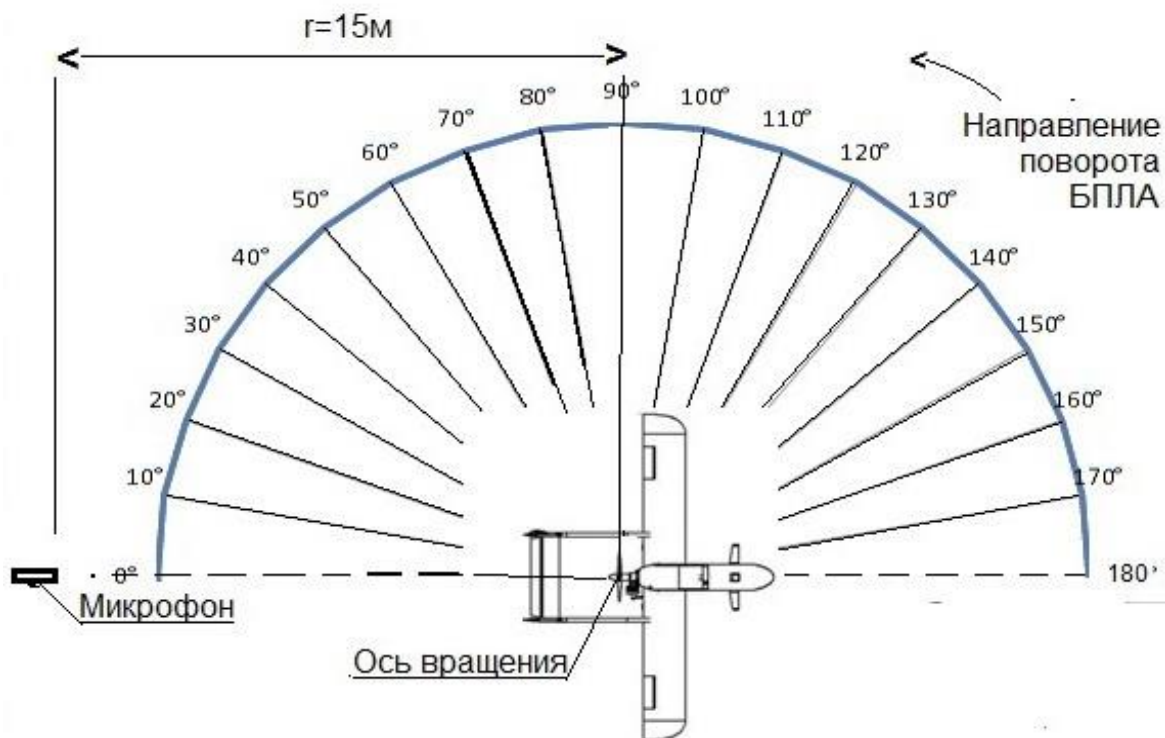


Рис.3. Схема проведения измерений: измерительный радиус $R = 15$ м; угол поворота БПЛА при проведении измерений изменяли с шагом 10° в диапазоне $\alpha = 0 \dots 180^\circ$

2. Спектральные характеристики акустического излучения СУ с двухтактным и четырёхтактным ДВС, без глушителей

Причины, вызывающие генерацию акустического излучения воздушным винтом (ВВ):

- лопасти винта оказывают периодическое силовое воздействие на окружающую среду, что приводит к излучению, названному шумом вращения;
- с лопастей винта по всей их длине происходит срыв потока, в результате чего за лопастями образуется сплошная вихревая пелена, которая служит источником широкополосного (вихревого) шума;
- лопасти винта при его вращении могут периодически проходить вблизи каких-либо элементов конструкции ЛА или же попадать в турбулентный след за этими элементами. При этом генерируется излучение в виде периодической последовательности импульсов давления.

Гармоническую составляющую шума ВВ называют обычно шумом вращения [2,3]. Частоты отдельных гармоник шума вращения винта (рис.4) кратны произведению частоты вращения винта (n , об/с) на число лопастей (z)

$$f_m = mnz, \quad (2)$$

где f_m – частота m -й гармоники.

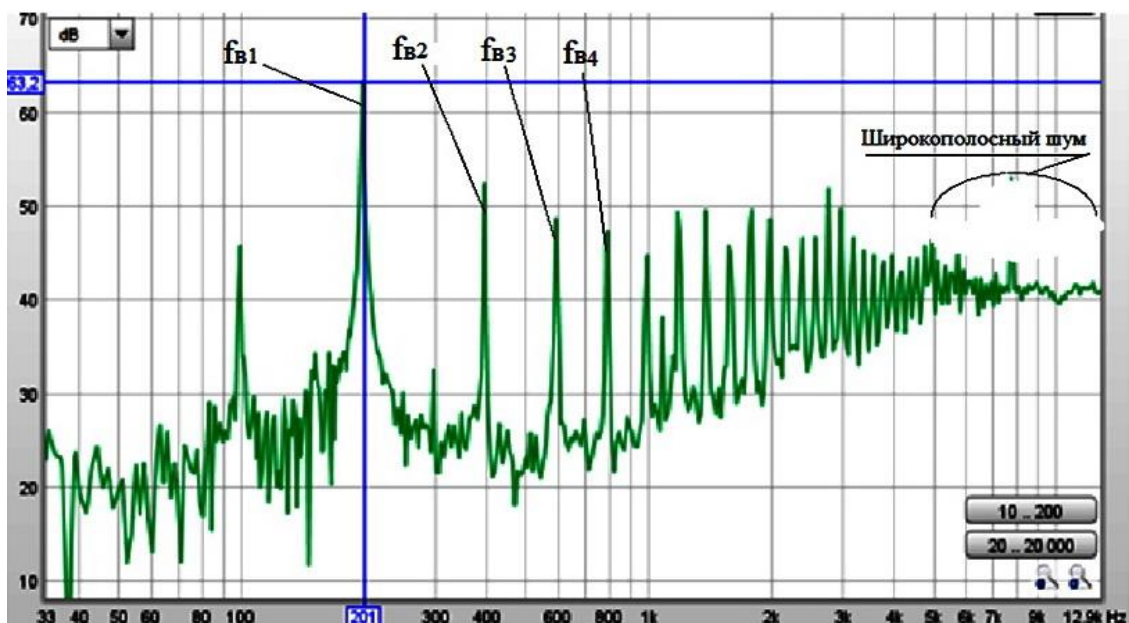


Рис.4. АЧХ двухлопастного воздушного винта 10×6"

Шум двигателя обусловлен рядом факторов, важнейшими из которых являются:

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

Гармонические составляющие шума поршневого двигателя [4] кратны частоте следования вспышек f_{δ} в цилиндрах двигателя и определяются соотношением

$$f_{\delta} = mn_{кв}i/30\tau, \quad (3)$$

где m – номер гармоники;

$n_{кв}$ – частота вращения коленвала двигателя, об/мин;

i – число цилиндров двигателя;

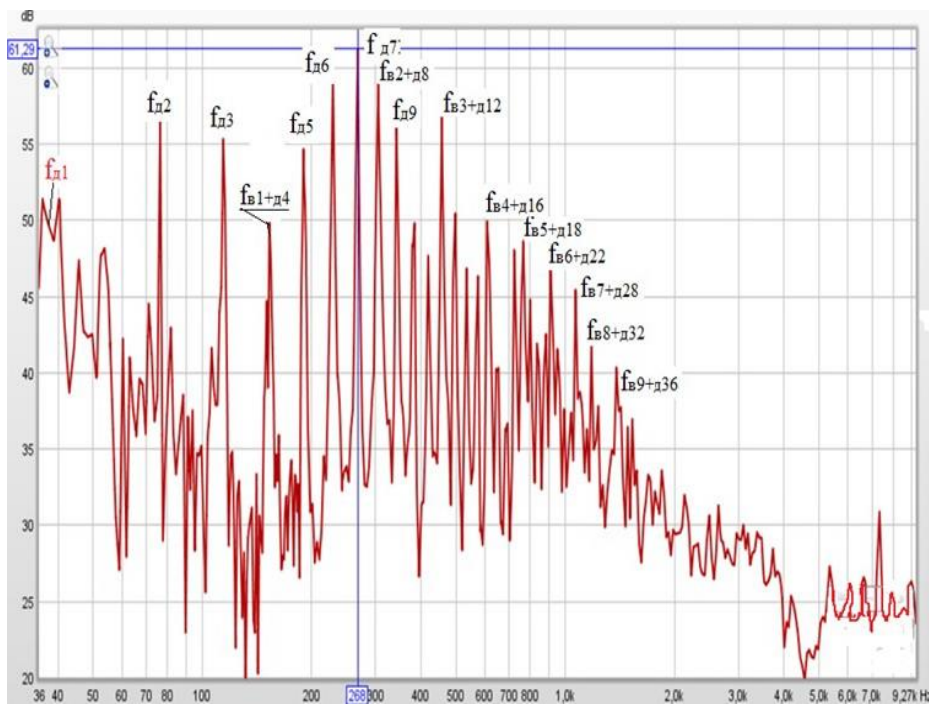
τ – тактность двигателя.

Спектральный максимум f_m вихревой составляющей шума впуска и выхлопа характеризуется числом Струхала St

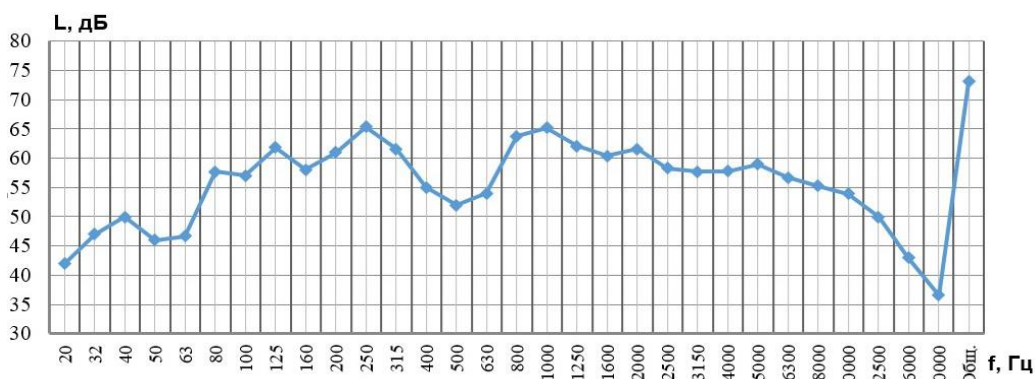
$$St = f_m h / u_r, \quad (4)$$

Число Струхала зависит от характерного геометрического размера отверстия, через которое происходит впуск воздуха и выхлоп отработанных газов. В качестве такого размера используют величину подъема h клапана; u_r – скорость впуска свежего заряда или скорость выхлопа отработанных газов.

На рис. 5, а, б показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) силовой установки БПЛА «Эко». Двигатель поршневой, одноцилиндровый, четырёхтактный, с глушителем на выхлопе. Воздушный винт – 17×8".



а



б

Рис.5. Спектр интенсивности излучения шума силовой установки БПЛА «Эко»ДВС O.S.GF30 «Saeto», в статических условиях: а – в 1/48 октавных полосах частот; б – в третьоктавных полосах частот

Спектр шума, производимого СУ на базе двухтактного двигателем DLE-30, без глушителя. Воздушный винт 18×10”

Частота вращения коленчатого вала двигателя $n_{кв} = 4500$ об/мин. В таблице 2 сведены частоты гармонических составляющих шума ДВС f_{∂} , Гц, полученные расчётом согласно формуле (4), и соответствующие им значения средних частот в третьоктавных полосах.

Таблица 2

Таблица соответствия частот гармонических составляющих шума ДВС

f_{∂} , Гц	75	150	225	300	375	450	525	600	675	750
1/3 октавные полосы частот	80	160	200	315	400	500	500	630	630	800

На графике (рис. 6) показаны спектры шума, соответствующие углам наблюдения $\alpha = 0 \dots 180^\circ$.

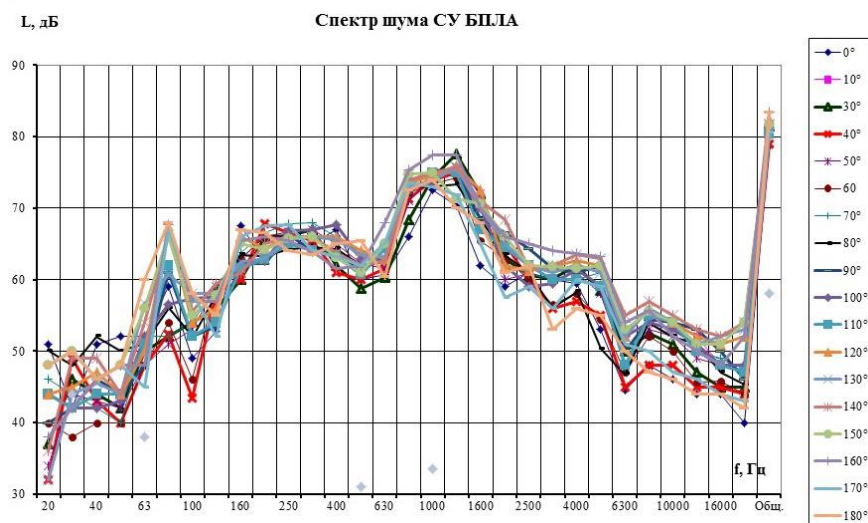


Рис.6. Спектры шума силовой установки БПЛА «Эко» с ДВС DLE-30, без глушителя. Винт 18×10". Углы наблюдения в диапазоне $\alpha = 0 \dots 180^\circ$

Частотный состав колебаний воздуха во впускном и выпускном насадках ДВС зависит от частоты возбуждающих импульсов и собственных колебаний, частота которых определяется геометрическими размерами впускной или выпускной трубы.

Частоту основной составляющей спектра вынужденных колебаний воздуха во впускном канале и её гармоник $f_{вк}$ [5] определяют по формуле

$$f_{вк} = mkn_{кв} / 60, \quad (5)$$

где m – номер гармоники;

$k = 1$, означает число импульсов за один оборот, что совпадает с частотой зажигания ДВС;

$n_{кв} = 4500$ об/мин – частота вращения коленвала двигателя.

Частоту составляющих собственных колебаний воздуха в выпускном насадке f_c [5] (труба, открытая с одной стороны) определяют по формуле

$$f_c = (2n - 1)C / 4(l + \pi r / 2), \quad (6)$$

где n – числовой ряд 1,3,5,7,...;

$C = 340$ м/с – скорость звука;

$l = 0,07$ м – длина трубы конфузора;

$r = 0,012$ м – радиус трубы конфузора,

откуда частота составляющих собственных колебаний воздуха в выпускном насадке: $f_{c1} = 991,8$ Гц, $f_{c2} = 4959,2$ Гц, $f_{c3} = 8926,5$ Гц (полосы частот: 1000, 5000, 8000 Гц).

Частоты гармонических составляющих шума вращения воздушного винта f_e для данной СУ, полученные расчётом согласно формуле (2), и соответствующие им значения средних частот в третьоктавных полосах сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Таблица соответствия частот, шума вращения воздушного винта

$f_{\text{в}}$, Гц	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350
1/3 октавные полосы	160	315	500	630	800	1000	1000	1250	1250

Если доминирующим источником широкополосного шума является вихревая пелена за лопастями винта (шум задней кромки), то ожидаемую частоту шума наибольшей интенсивности $f_{\text{м}}$ (спектральный максимум) определяют как

$$f_{\text{м}} = StU / L, \quad (7)$$

где $St = 0,2$ – число Струхала;

$U = 2\pi r_{0,75} n_c$ – характерная скорость обтекания профиля лопасти;

$L = bs \sin \alpha + \delta \cos \alpha$ – эффективная толщина профиля лопасти.

Для винта диаметром 460 мм и шагом 254 мм установочный угол $\alpha = 14^\circ 48'$, $b_{0,75} = 30,4$ мм, $\delta_{0,75} = 4,5$ мм и соответственно $L = 0,01212$ м. $U = 81,3$ м/с. Тогда частота спектрального максимума шума задней кромки $f_{\text{м}} = 1340$ Гц (полоса 1250 Гц).

Спектр шума, производимого СУ на базе четырёхтактного ДВС O.S.GF30 «Saeto»

АЧХ акустического излучения СУ на базе четырёхтактного ДВС O.S.GF30 «Saeto» без глушителя с винтом 17×8" показаны, в виде графика (рис. 7)

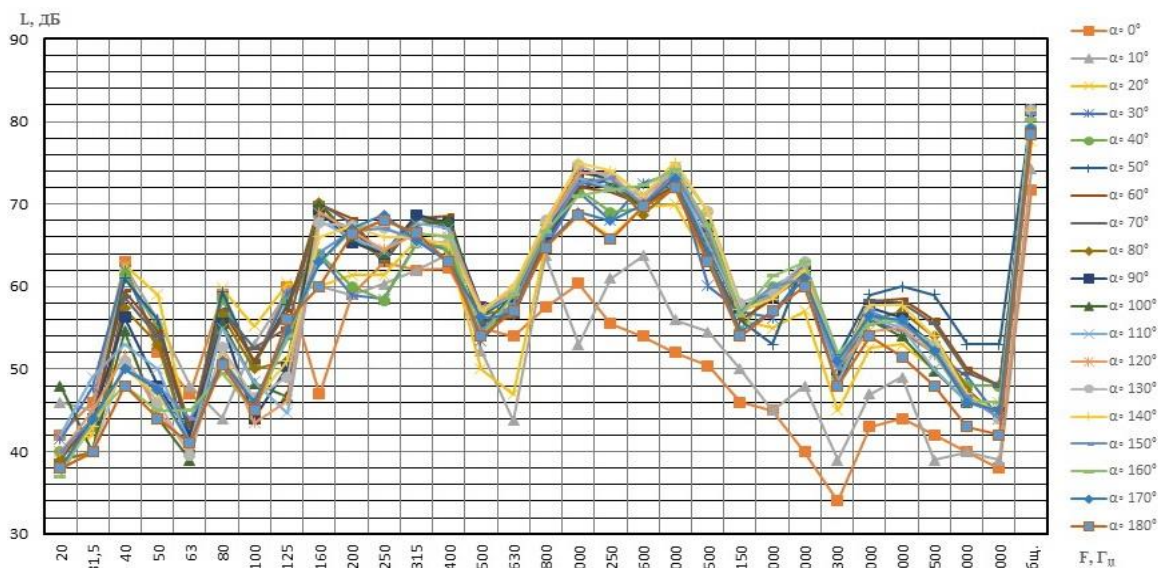


Рис.7.Спектры шума силовой установки БПЛА «Эко» с ДВС O.S.GF30 «Saeto» (четырёхтактный без глушителя). Винт 17×8" R-DFDL Propeller

Составляющие шума четырёхтактного ДВС O.S.GF30 «Saeto» без глушителя

Частота вращения коленвала двигателя $n_{кв} = 5100$ об/мин. В таблицу 4 сведены частоты гармонических составляющих шума ДВС f_{∂} , Гц, полученные расчётом согласно формуле (4) (при $m = 1, 2, 3, 4, \dots, 16$), и соответствующие им значения средних частот в третьоктавных полосах.

Таблица 4

Таблица соответствия частот гармонических составляющих шума ДВС
O.S.GF30 «Saeto»

f_{∂} , Гц	42,5	85	127,5	170	212,5	255	297,5	382,5	467,5	510,0	595,0	680
							340,0	425,0		552,5	637,5	
1/3 октавные полосы	40,0	80	125,0	160	200,0	250	315,0	400,0	400,0	500,0	630,0	630

Частота основной составляющей спектра вынужденных колебаний воздуха во впускном канале соответствует частоте зажигания в ДВС и согласно формуле (5) равна $f_{вх1} = 170$ Гц при $n_{кв} = 5100$ об/мин и $k = 2$.

Частоты составляющих собственных колебаний воздуха f_c в выпускном насадке при n – числовой ряд 1, 3, 5, 7, ..., $C = 340$ м/с – скорость звука, $r = 0,006$ м – радиус трубы, $l = 0,067$ м – длина трубы, согласно формуле (6) составляют: $f_{c1} = 1112$ Гц, $f_{c2} = 5560$ Гц, $f_{c3} = 10010$ Гц (полосы частот: 1000, 5000, 10000 Гц).

Гармонические составляющие шума воздушного винта 17×8" R-DFDL Propeller

Частоты гармонических составляющих шума вращения воздушного винта f_{∂} для данной СУ, полученные расчётом согласно формуле (2), и соответствующие им значения средних частот в третьоктавных полосах частот, сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Таблица соответствия частот шума вращения воздушного винта 17×8"

f_{∂} , Гц	170	340	510	680	767	850	1020	1190	1360	1530
1/3 октавные полосы	160	315	500	630	800	800	1000	1250	1250	1600

Спектральный максимум широкополосного шума от вихревой пелены за лопастями винта f_m , при $St = 0,2$, $U = 86,48$ м/с, $L = 0,01218$ м ($\alpha = 11^\circ$, $b_{0,75} = 29,4$ мм, $\delta_{0,75} = 4,7$ мм) приходится на частоту $f_m = 1663$ Гц (полоса 1600 Гц).

Сравнение уровней шума от силовых установок с двухтактным и четырёхтактным ДВС без глушителей

Графики спектров шума силовой установки БПЛА «Эко» (обе комплектации) в третьоктавных полосах частот (рис. 6, 7) условно можно разделить на

четыре области, в каждой из которых превалирует шум от конкретного источника. Первая область (область низких частот) ограничивается начальными гармониками шума ДВС от одной до трёх (рис. 5, а) в случае двухтактного и четырёхтактного двигателей. Вторая область с максимальной интенсивностью излучения (низкие и средние частоты) начинается от первой гармоники шума вращения винта (включает в себя высшие гармоники шума ДВС) и заканчивается в районе 500...600 Гц. Шум здесь имеет высокую интенсивность, так как излучение от ДВС и винта происходит на одинаковых частотах (рис. 6, 7). Третья область выше 600, 1000 Гц в большей части имеет сплошной спектр, на фоне которого выделяются гармонические составляющие на частотах выхлопа двигателя и вихревого шума обтекания лопастей воздушного винта. Как можно видеть, в случае отсутствия глушителей именно они определяют уровни шума СУ в целом.

Необходимо отметить, что в обоих комплектах СУ, использованных без глушителей, проекция среза выхлопных труб на плоскость вращения винта попадала в область с радиусом $r_{0,5}$. Кроме того, винты в толкающей компоновке работают в турбулентном следе расположенных перед ними элементов планера. Именно поэтому компонента шума от неустановившейся нагрузки на воздушный винт имеет место и вклад вихревых составляющих в данном случае оказывается таким высоким. В состав СУ с двухтактным двигателем DLE-30 входит воздушный винт диаметром 460 мм и шагом 254 мм (число оборотов при испытаниях $n_g = 4500$ об/мин), четырёхтактный ДВС O.S.GF30 «Saeto» укомплектован винтом 18×10". Так как ДВС O.S.GF30 «Saeto» укомплектован винтом с меньшим диаметром, то для получения одинаковой тяги число оборотов на нем было увеличено. Увеличение числа оборотов СУ [9] приводит к увеличению интенсивности уровней излучения шума и смещению частот спектральных составляющих в сторону более высоких частот. Четвёртая область выше 12500 Гц имеет сплошной спектр с низкой интенсивностью излучения.

Тем не менее видно, что во всех четырех областях спектров превалирует шум от СУ с двухтактным двигателем DLE-30 (рис. 6, 7). Вероятно, причина кроется в более плавном перераспределении нагрузки на двигатель при четырёхтактном способе работы.

3. СУ на базе одноцилиндрового четырёхтактного ДВС O.S.GF30 "Saeto" со штатным глушителем F-6040

На рис. 8 показан чертёж ДВС O.S.GF30 «Saeto» с глушителем F-6040. Присоединительный патрубок и выхлопной патрубок глушителя находятся под углами к оси микрофона соответственно 120° и 146° согласно схеме измерений (рис. 3).

АЧХ акустического излучения СУ на базе четырёхтактного ДВС O.S.GF30 «Saeto» со штатным глушителем F-6040, воздушным винтом 17×8" R-DFDL Propeller (диаметр 432 мм и шаг 203 мм) показаны в виде графика (рис. 9).

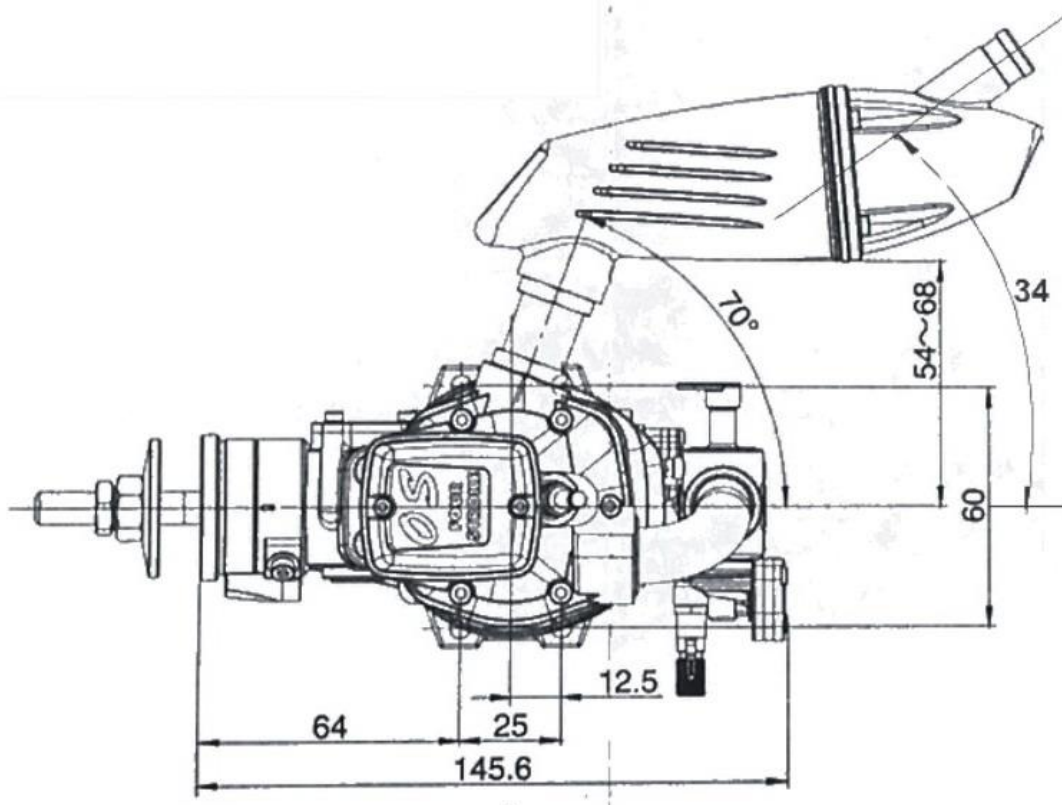


Рис.8. Чертёж ДВС O.S.GF30 «Saeto» со штатным глушителем F-6040

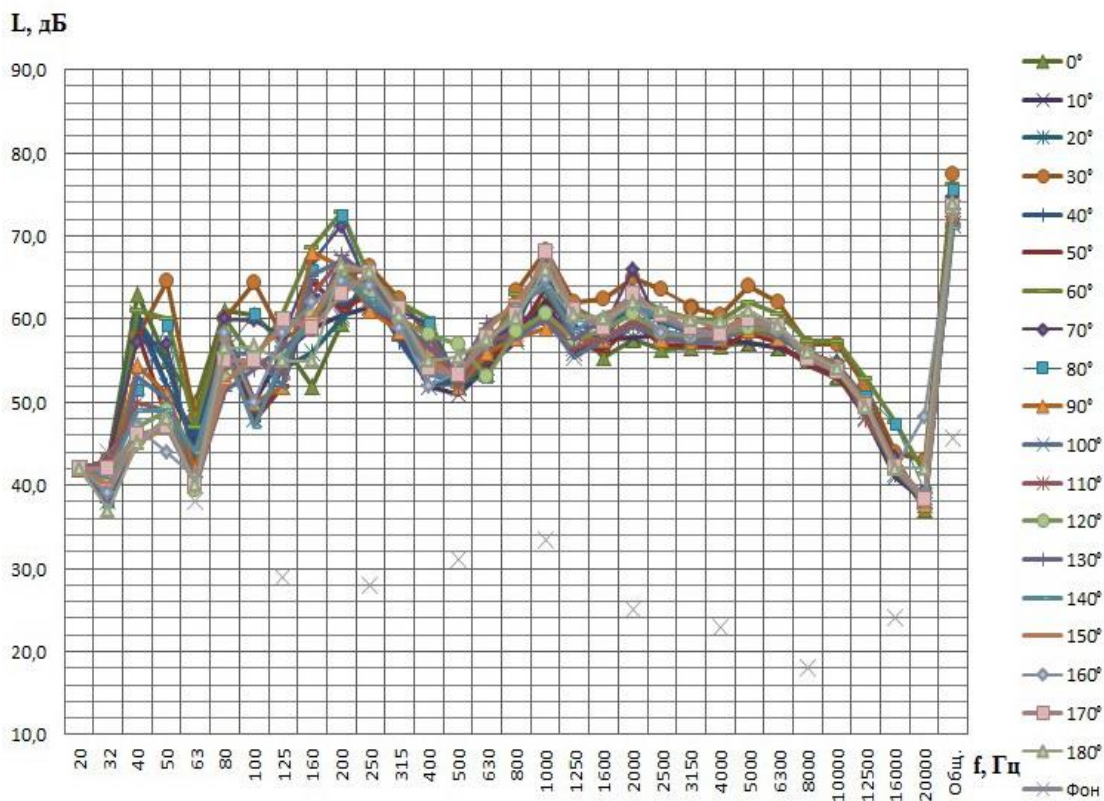


Рис.9. Спектры шума силовой установки БПЛА «Эко» с ДВС O.S.GF30 «Saeto», четырёхтактный со штатным глушителем F-6040". Винт 17×8" R-DFDL Propeller

Несмотря на увеличенное значение числа оборотов ДВС ($n_{кв} = 5100...5500$ об/мин), сравнение АЧХ данной СУ с глушителем и без него показало значительное уменьшение шума при наличии глушителя. В диапазоне частот от 1000 до 16000 Гц, в который попадают гармонические составляющие на частотах выхлопа двигателя, шум уменьшился на 7дБ. Также нужно отметить уменьшение шума в диапазоне 200...400 Гц за счет уменьшения амплитуд высших гармоник работы ДВС.

4. Направленность излучения шума винтомоторными силовыми установками

Направленность излучения шума СУ с ДВС без глушителей выхлопа

Следующим по значимости параметром, влияющим на заметность БПЛА, а именно его пеленг, является направленность его излучения. На рис. 10 показаны характеристики направленности суммарного излучения винтомоторных силовых установок с одноцилиндровым четырёхтактным ДВС O.S.GF30 «Saeto» и двухтактным ДВС DLE-30, без глушителей. Углы наблюдения $\alpha = 0...180^\circ$. Компонировка – толкающая.

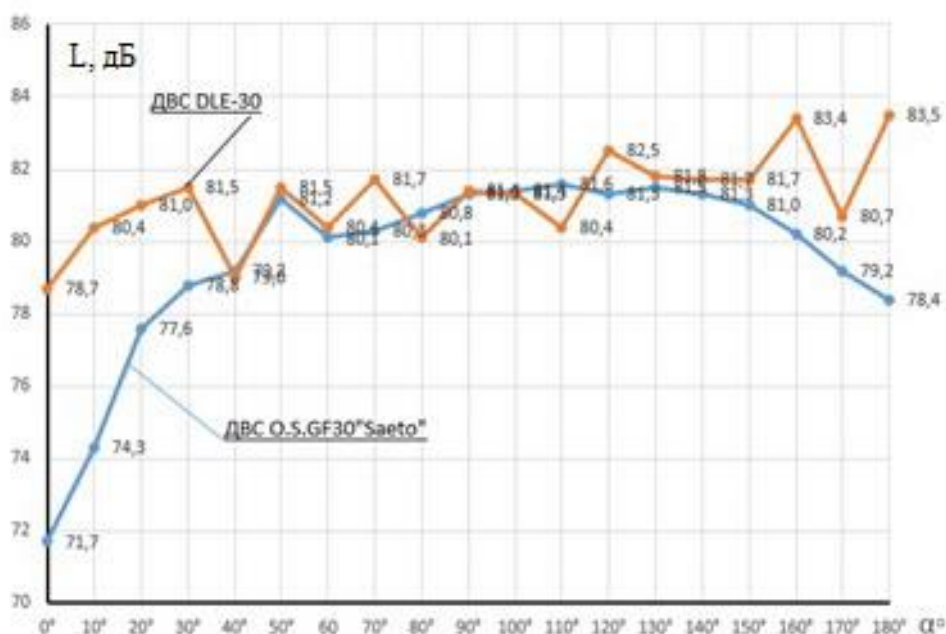


Рис.10. Сравнение характеристик направленности излучения силовых установок с двухтактным и четырёхтактным ДВС без глушителей

У СУ с четырёхтактным ДВС видны максимумы в передней полусфере (углы $90...150^\circ$), в направлении выхлопа двигателя. У СУ с двухтактным ДВС этот диапазон занимает область $70...150^\circ$. Максимум в задней полусфере в направлении угла 50° у обоих СУ предположительно может быть следствием структурного шума не закапотированного ДВС и вибрации. Значительно более высокая интенсивность излучения шума у СУ с одноцилиндровым двухтактным двигателем наблюдается по оси коленвала. На азимуте 0° разница достигает 7дБ, на азимуте 180° – 5 дБ. На рис.11 проказана характеристика направленности

сти излучения широкополосного шума СУ с четырёхтактным ДВС (без глушителя), в диапазоне частот 1000...5000 Гц (толкающая компоновка).

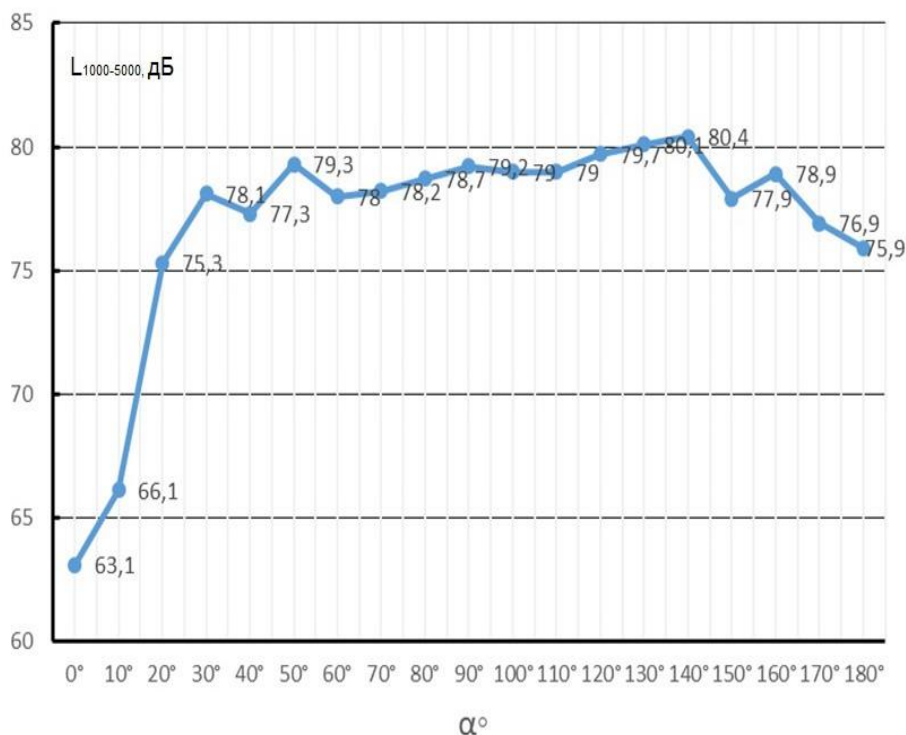


Рис.11. Характеристика направленности излучения широкополосного шума силовой установки БПЛА «Эко» с ДВС O.S.GF30 «Saeto», четырёхтактный без глушителя. Винт 17×8" R-DFDLPropeller. Диапазон частот 1000...5000 Гц (толкающая компоновка)

Излучение большей частью носит непрерывный характер. Ломаная пространственная форма характеристики направленности указывает на наличие разных источников, важнейшими из которых являются: вихревая пелена за винтом, широкополосная составляющая шума от неустановившейся аэродинамической нагрузки винта, вихревая составляющая шума впуска и выхлопа ДВС, а также высокочастотная составляющая от структурного шума двигателя. Видно, что именно широкополосная составляющая шума в значительной степени формирует диаграмму направленности СУ.

Направленность излучения шума СУ с применением глушителей на выхлопе

На рис. 12 показаны характеристики направленности при работе СУ с четырёхтактным ДВС и двумя различными глушителями и без глушителей.

Хотя при колебаниях числа оборотов двигателя можно проводить только качественное сравнение, тем не менее можно отметить, что суммарный уровень шума от БПЛА с применением глушителей уменьшился на 7...9 дБ по всем направлениям вследствие уменьшения шума выхлопа ДВС. Различие в интенсивности излучения в передней (100...160°) и задней (30°) области объясняется направлением выхлопных патрубков и различным объемом глушителей (рис. 8,13).

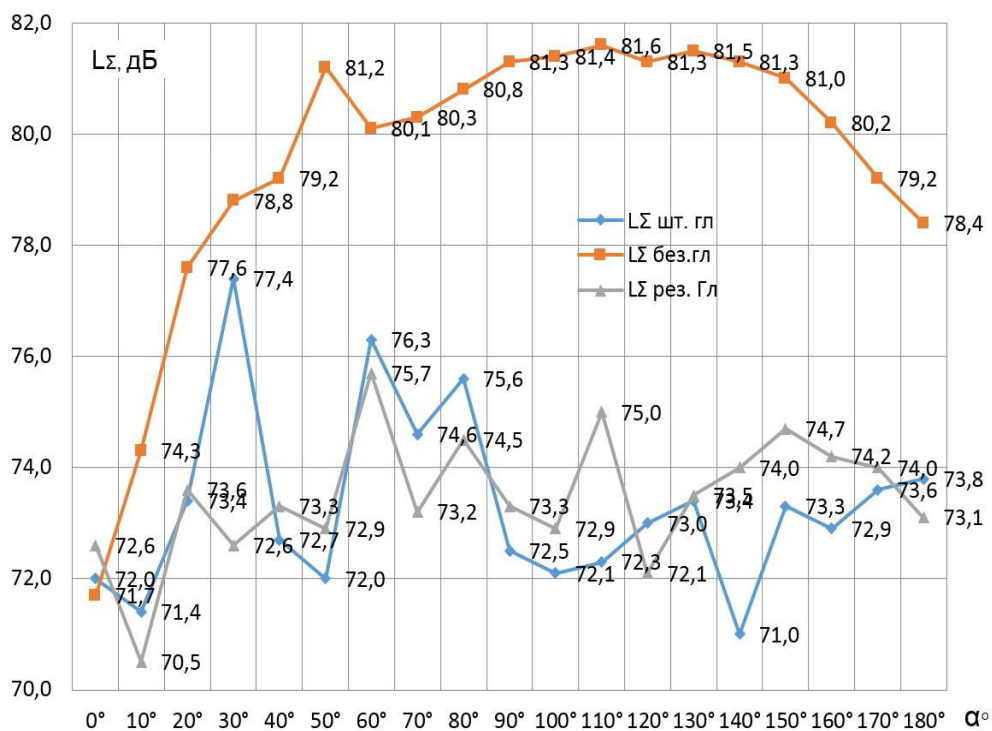


Рис.12. Характеристики направленности работы СУ с четырёхтактным ДВС без глушителя и с глушителями: штатным F-6040 и реактивным

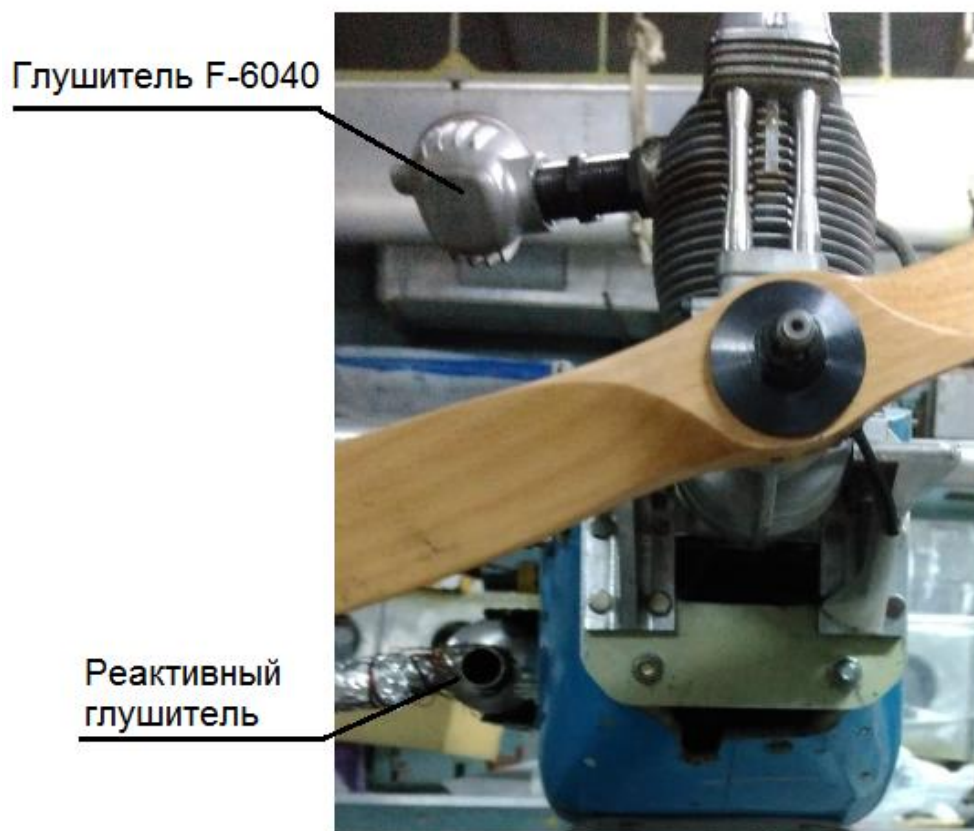


Рис.13. Проекция среза выхлопных труб на плоскость вращения винта, которая попадала в область с радиусом $r_{0,5}$. ДВС O.S.GF30 «Saeto». Винт 17×8"

5. Акустическая заметность БПЛА с винтомоторными силовыми установками на базе четырехтактного и двухтактного ДВС без глушителей выхлопа

Зона акустической заметности – область пространства вокруг БПЛА, при нахождении вне которой наблюдателя БПЛА не может быть обнаружен по его акустическому излучению.

Сравнивается акустическая заметность БПЛА «Эко» с силовыми установками на базе четырехтактного и двухтактного ДВС без глушителей выхлопа. Зону акустической заметности $r_{\partial.o}$, м (дальность обнаружения) [8] определяли по формуле

$$r_{\partial.o} = 10^{\left(\frac{L_0 - L_{\phi} + 2}{20} + \log_{10} r_0 \right)}, \quad (8)$$

где L_0 – суммарный уровень акустического излучения от БПЛА, дБА, измеренный на расстоянии $r_0 = 15$ м, в соответствующем направлении;

$L_{\phi} = 54,9$ дБА – суммарный уровень фона, измеренный при проведении исследований (аэродром ХАИ)

Результаты представлены в виде характеристик направленности в таблице 6 и на рис. 14.

Таблица 6

Сравнение акустической заметности БПЛА «Эко» с силовыми установками на базе четырехтактного и двухтактного [9] ДВС, без глушителей выхлопа

α°	L_{Σ} , дБА,		ΔL	$r_{\partial.o}$, м		Δr
	ДВС двухтактный	ДВС четырёхтактный		ДВС двухтактный	ДВС четырёхтактный	
0°	75,2	66,2	9	195	69	125
10°	80,3	69,1	11,2	351	97	254
20°	80,9	76,2	4,7	388	219	168
30°	81,1	79,1	2	333	306	27
40°	79,8	78,3	1,5	361	279	82
50°	80,5	80	0,5	306	340	-34
60°	79,1	79,1	0	368	306	62
70°	80,2	79,2	1	353	310	43
80°	79,1	79,4	-0,3	305	317	-12
90°	80,7	80	0,7	368	340	28
100°	80,3	79,8	0,5	353	332	21
110°	80,3	79,6	0,7	351	324	27
120°	81,2	80,4	0,8	388	356	32
130°	80,6	80,6	0	363	364	-1
140°	81,3	81,1	0,2	395	386	9
150°	80,2	79,7	0,5	348	328	20
160°	82,7	80	2,7	463	340	123
170°	78,5	77,9	0,6	284	267	17
180°	78,4	77	1,4	282	240	42

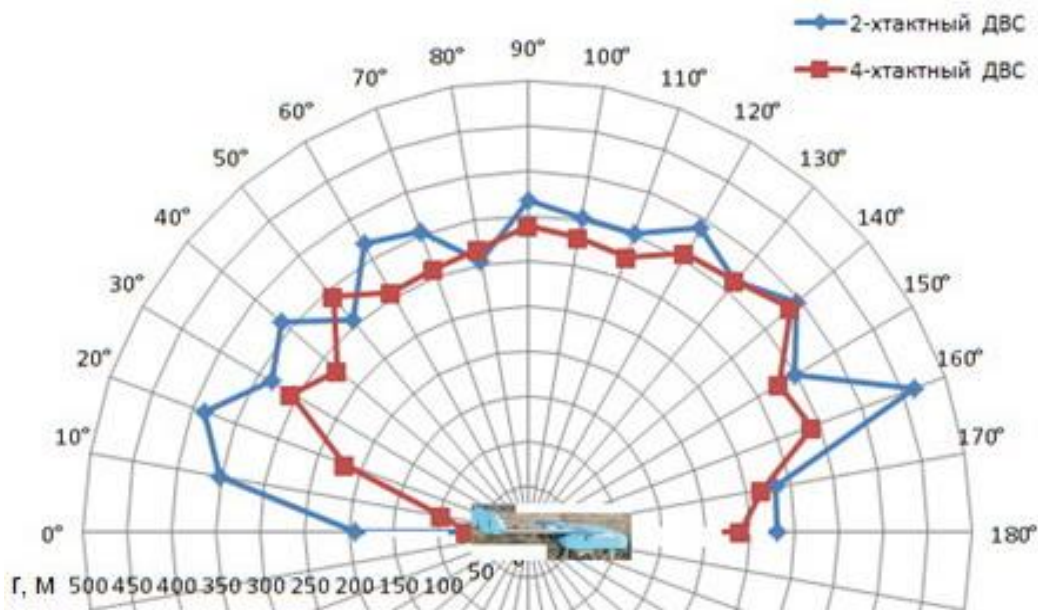


Рис.14. Дальность обнаружения БПЛА «Эко» с силовыми установками на базе двухтактного и четырехтактного ДВС. Толкающая компоновка

Заметен выигрыш в дальности обнаружения, у СУ с четырёхтактным ДВС как в направлении полёта, так и в задней полусфере. Значительная разница наблюдается под углом 160° в направлении выхлопа ДВС.

Выводы

Для снижения уровня шума БПЛА на местности необходим комплексный подход, заключающийся в снижении шума силовой установки, излучаемого воздушным винтом, и шума, излучаемого ДВС.

Для снижения шума, излучаемого поршневым двигателем, необходимо применять глушители шума в трактах выхлопа ДВС и желательно впуска.

Установка глушителя с увеличенным объемом резонатора по сравнению со штатным глушителем может привести к существенному уменьшению уровня излучаемого шума в области низких и средних частот.

При выборе СУ БПЛА следует учитывать то, что двухтактные поршневые двигатели являются доминирующим источником в шуме винтомоторных СУ при отсутствии капота и глушителей в трактах впуска и выхлопа. Применение четырёхтактного ДВС значительно уменьшает шум СУ.

Для СУ с толкающим воздушным винтом необходимо учитывать влияние турбулентных следов за элементами планера. Поместив ДВС вместе с глушителем в капот, можно значительно уменьшить интенсивность акустического излучения винта на частотах, кратных частоте следования лопастей винта.

Список литературы

1. Международные стандарты и рекомендуемая практика «Охрана окружающей среды», Приложение 16, Том 1. «Авиационный шум» издание 6, 2011. – 114 с.

2. Мунин А.Г., Квитка В.Е. Авиационная акустика. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
3. Гутин Л.Я. О звуковом поле вращающегося винта // ЖТФ. – Т.6. Вып. 5, 1936. – С. 899 – 909
4. Шатров М.Г., Яковенко, А.Л., Кричевская, Т.Ю. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания. – М.: МАДИ, 2014. – 68 с.
5. Канне А.Б. Борьба с шумом всасывания дизелей. – Л.: Машиностроение, 1969. – 144 с.
6. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве. Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
7. Фолкнер Л.Л. Справочник по контролю промышленных шумов. Пер. с английского. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.
8. Руденко В.В. Глава 5. Акустическая заметность БПЛА «Эко» и «Электра» /Отчёт Д 501-2/2017 П-Исследование характеристик радиолокационной, визуальной, тепловой и звуковой заметности на базе существующих БЛА «Эко» и «Электра». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://library.khai.edu>

References

1. Mezhdunarodnye standarty I rekomenduemaya praktika «Okhrana okruzhayushchei sredy».[International Standards and Recommended Practice «Environmental Protection»], Prilozhenie 16, Tom 1.«Aviatsionnyi shum» izdanie 6, 2011.– 114 p.
2. Munin A.G., Kvitka V.E. Aviatsionnaya akustika. [Aviation acoustics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.– 448 p.
3. Gutin L.Ya., O zvukovom pole vrashchayushchegosya vinta // ZhTF. [About the sound field of a rotary screw], T.6. vol. no 5, 1936. – P. 899 – 909
4. Shatrov M.G., Yakovenko, A.L., Krichevskaya, T.Yu. Shum avtomobil'nykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya.[Noise of automobile internal combustion engines]. Moscow, MADI Publ., 2014.– 68 p.
5. Kanne A.B., Bor'ba s shumom vsasyvaniya dizelej. [Fighting diesel suction noise] Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969. – 144 p.
6. Yudin E.Ya., Bor'ba s shumom na proizvodstve. Spravochnik.[Noise control in the workplace]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985.– 400 p.
7. Folkner L.L., Spravochnik po kontrolju promyshlennykh шумов. – per. s anglijskogo, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. – 448 p.
8. Rudenko V.V., Glava 5. Akusticheskaja zametnost' BPLA «Jeko» i «Jelektra»/Otchjot D 501-2/2017 P-Issledovanie harakteristik radiolokacionnoj, vizual'noj, teplovoj I zvukovoj zametnosti na baze sushhestvujushhih BLA «Jeko» i «Jelektra». [Acoustic visibility of the UAV «Eco» and «Electra» / Report D 501-2 / 2017 P-Study of the characteristics of radar, visual, thermal and sound visibility based on the existing UAV «Eco» and «Electra»]. [Electronic resource]. - Access mode: <http://library.khai.edu>

Поступила в редакцию 05.09.2020, рассмотрена на редколлегии 06.09.2020

**Акустична помітність безпілотних літальних апаратів
з силовими установками на базі поршневих двигунів**

Наявність в експлуатації безлічі прототипів БПЛА з гвинтовими рушіями, застосування таких апаратів на відносно низьких висотах і швидкостях польоту робить актуальною проблему зниження шуму від БПЛА з точки зору як акустичної непомітності, так і екології.

Мета роботи – визначення комплексу методів, що сприяють зниженню помітності БПЛА в акустичному діапазоні. Показано, що основним джерелом шуму від БПЛА на місцевості є силова установка, до складу якої входять двигун і гвинтовий рушій. Досліджено параметри силових установок, що впливають на процеси, які визначають акустичну помітність БПЛА. Проведено комплексний аналіз чинників, що впливають на помітність. До складу силових установок входять двотактний і чотиритактний двигуни, внутрішнього згоряння і двухлопастні повітряні гвинти. Розглянуто застосування глушників шуму на вихлопі ДВС. Отримано спектральні характеристики акустичних полів гвинтомоторних силових установок для чинного зразка БПЛА «Еко». Виміри проведено в третьоктавних і 1/48 октавних смугах частот у статичних умовах. Місце проведення – аеродром ХАІ. Відзначимо, що повітряні гвинти, що входили до складу силових установок, працювали при числах Рейнольдса ($Re_{0,75} < 2 \cdot 10^5$), що істотно може впливати на його аеродинамічні і акустичні характеристики. Показано, що при виборі СУ БПЛА слід враховувати те, що двотактні поршневі двигуни є домінуючим джерелом у шумі гвинтомоторних СУ за відсутності капота і глушників у трактах впуску і вихлопу. Застосування чотиритактного ДВС значно зменшує шум СУ. У загальному випадку положення кордонів зони акустичної помітності БПЛА в місці розташування спостерігача визначається співвідношенням між інтенсивністю сприйманого спостерігачем акустичного випромінювання від БПЛА і інтенсивністю звуку, відповідного природному акустичному фону і залежить від ступеня прояву акустичних ефектів, які супроводжують поширення звуку в турбулентній атмосфері - рефракції звукових хвиль, поглинання і розсіювання акустичної енергії. Проведено розрахунок і порівняння дальності виявлення БПЛА з урахуванням існуючих природних маскерів.

Наведено результати експериментальних досліджень, які дозволяють оцінити ступінь акустичної помітності БПЛА. Визначено комплекс заходів, спрямованих на зменшення інтенсивності акустичної помітності БПЛА в різних областях спектра випромінювання.

Ключові слова: повітряний гвинт, чотиритактний двигун, амплітудно-частотна характеристика, діаграма спрямованості, рівень, шум обертання.

Acoustic signature of unmanned aerial vehicles with power plants based on piston engines

The presence in operation of many prototypes of UAVs with propeller propellers, the use of such devices at relatively low altitudes and flight speeds makes the problem of noise reduction from UAVs urgent both from the point of view of acoustic imperceptibility and ecology.

The aim of the work is to determine a set of methods that help to reduce the visibility of UAVs in the acoustic range. It is shown that the main source of noise from the UAV on the ground is the power plant, which includes the engine and the propeller. The parameters of the power plants influencing the processes that determine the acoustic signature of the UAV were investigated. A comprehensive analysis of the factors affecting visibility was carried out. The power plants include two-stroke and

four-stroke engines, internal combustion and two-blade propellers. The use of silencers on the exhaust of the internal combustion engine was considered. The spectral characteristics of the acoustic fields of the propeller-driven power plants for the operating sample of the UAV "Eco" were obtained. The measurements were carried out in one-third octave and 1/48 octave frequency bands under static conditions. The venue is the KhAI airfield. Note that the propellers that were part of the power plants operated at Reynolds numbers ($Re_{0,75} < 2 \cdot 10^5$), which can significantly affect its aerodynamic and acoustic characteristics. It is shown that when choosing a UAV control system, one should take into account the fact that two-stroke piston engines are the dominant source in the noise of propeller-driven control systems in the absence of a hood and mufflers in the intake and exhaust tracts. The use of a four-stroke internal combustion engine significantly reduces the noise of the control system. In the general case, the position of the boundaries of the zone of acoustic visibility of a UAV at the location of the observer is determined by the ratio between the intensity of acoustic radiation perceived by the observer from the UAV and the intensity of sound corresponding to the natural acoustic background and depends on the degree of manifestation of acoustic effects accompanying the propagation of sound in a turbulent atmosphere - the refraction of sound waves. Absorption and dissipation of acoustic energy. The calculation and comparison of the UAV detection range was carried out taking into account the existing natural maskers.

The results of experimental studies are presented that allow assessing the degree of acoustic signature of the UAV. A set of measures aimed at reducing the intensity of the acoustic signature of the UAV in various regions of the radiation spectrum has been determined.

Key words: propeller, four-stroke engine, amplitude-frequency characteristic, directional diagram, level, rotation noise.

Сведения об авторах:

Руденко Валерий Владимирович – научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

Калужин Игорь Владимирович – к.т.н., ведущий научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

Андрущенко Наталья Александровна – младший научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

About the Authors:

Rudenko Valery Vladimirovich - Researcher, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky«KhAI», Kharkov, Ukraine

Kaluzhinov Igor Vladimirovich - Leading Researcher, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky«KhAI», Kharkov, Ukraine

Andrushchenko Nataliia Aleksandrovna - Junior Researcher, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky«KhAI», Kharkov, Ukraine