

УДК 621.43:629.7.03.035:534.83:629.735.33

## **Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке**

**Самохин В.Ф.<sup>1\*</sup>, Остроухов С.П.<sup>1</sup>, Мошков П.А.<sup>2\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора*

*Н.Е.Жуковского (ЦАГИ), ул. Радио, 17, Москва, 105005, Россия*

<sup>2</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, ГСП-3, А-80, 125993, Россия*

*\* e-mail: samohin\_vf@mail.ru*

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

### **Аннотация**

Представлены основные результаты трубных акустических испытаний малоразмерного беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке. Приведены спектральные, интегральные и энергетические характеристики силовой установки (СУ) БПЛА. Установлено, что в шуме СУ БПЛА, включающей двухтактный поршневой двигатель и винто-кольцевой движитель (ВКД) в толкающей компоновке, при отсутствии у поршневого двигателя глушителя шума выхлопа, наибольший вклад в общий шум системы вносит гармоническое излучение от выхлопа двигателя. Суммарный уровень шума силовой установки БПЛА определяется, в основном, первыми 10-ю гармониками шума двигателя и первыми 5-ю гармониками шума вращения винта. Вклад первых пяти гармоник шума вращения винта в суммарную интенсивность

акустического излучения СУ БПЛА составляет на режиме малого газа ~38%, на крейсерском режиме ~23%, на режиме полного газа ~3%. Акустический КПД на режиме максимальной мощности СУ составляет ~1,1%.

**Ключевые слова:** шум малоразмерного летательного аппарата; шум поршневой СУ

### *Введение*

В связи с ростом числа БПЛА в мире, возникла проблема разработки новых и усовершенствования старых образцов малоразмерных летательных аппаратов различного назначения в России. Одним из важнейших критериев оценки БПЛА является уровень его акустических характеристик. Поэтому исследование акустических характеристик БПЛА с целью снижения уровня шума на местности уже существующих летательных аппаратов и разработка методов прогнозирования шума на местности перспективных самолетов, является весьма актуальным. Основным источником шума БПЛА является его СУ, в состав которой входят чаще всего поршневой двигатель и винтовой движитель различной конструкции и компоновки. Исследованию механизмов генерации шума воздушным винтом и поршневым двигателем посвящено значительное количество исследований в нашей стране и за рубежом. Выявлены основные механизмы и закономерности генерации шума винтами и двигателями и определены основные направления и методы снижения интенсивности генерируемого шума.

Вместе с тем широкое распространение в последние годы малоразмерных аппаратов с винтовыми движителями привело к дальнейшему развитию основных конструктивных схем винтовых движителей и условий их работы и, как следствие, к появлению дополнительных источников и механизмов генерации шума. В

частности, это винты в кольцевом обтекателе в толкающей и в тянущей компоновках, а также работа толкающего винта в условиях сильно турбулизованной внешней среды, и т.п. Нередко при толкающей компоновке ЛА выхлопные газы из двигателя выбрасываются в сторону работающего винта, что может оказать заметное влияние на акустические характеристики ЛА. Кроме того, для малоразмерных ЛА при анализе структуры акустического поля оказывается важным комплексный подход, учитывающий суммарное акустическое поле винтового движителя и двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в условиях конкретной компоновки силовой установки на ЛА. Поэтому исследование акустических характеристик винтовых движителей и ЛА в целом представляется актуальным и важным для решения экологических проблем малоразмерных летательных аппаратов.

### ***О шуме СУ БПЛА***

В состав силовой установки исследуемого малоразмерного ЛА входят: двухтактный поршневой двигатель и воздушный винт, которые и являются основными источниками шума БПЛА на местности. Двухтактные двигатели, по сравнению с четырехтактными, характеризуются более высокими значениями литровой мощности ( $N_{л}$ ). Чем выше литровая мощность, тем меньше рабочий объем и, соответственно, меньшие габариты и массу имеет двигатель при одинаковой номинальной мощности. Поэтому двухтактные двигатели являются более предпочтительными для малоразмерных ЛА.

Шум воздушного винта образуется, в основном, в результате силового взаимодействия лопастей с окружающей средой в процессе создания тяги и при вытеснении воздуха из фиксированного объема среды лопастями. Генерация акустического излучения может происходить, также, и при аэродинамическом взаимодействии лопастей с турбулентными образованиями в набегающем потоке. В соответствии с этим шум малонагруженного винта обычно подразделяют на шум вращения и широкополосный шум.

Поршневой двигатель в процессе своей работы генерирует акустическое излучение, которое распространяется в окружающую среду через каналы всасывания и выхлопа, а также через стенки цилиндров (структурный шум). Основными источниками шума в поршневом двигателе являются аэродинамические и механические процессы, сопровождающие впуск топливо-воздушной смеси в камеру сгорания (так называемый шум «впуска»), горение и выпуск отработавших газов (шум «выпуска»), а также процессы трения и удары при механическом перемещении деталей двигателя друг относительно друга в сочленениях и стыках.

Наиболее мощным источником акустического излучения является процесс выпуска газов из камеры сгорания в систему выхлопа. Уровень звуковой мощности этого источника выше, чем остальных источников, на 10...18 дБ во всем диапазоне частот.

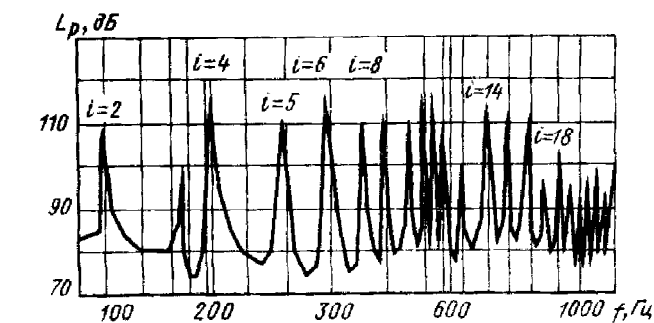


Рисунок 1 – Узкополосный спектр шума выпуска двухтактного двигателя ( $n_{\text{кв}}=3020$  об/мин)

Узкополосный спектр шума, излучаемого через выхлопной тракт двигателя, представлен на рисунке 1[1]. Хорошо видны дискретные составляющие с частотой  $f_i = f_0 i$ , кратной частоте зажигания  $f_0$ , здесь  $i=1,2,3\dots$ - номер соответствующей гармонической составляющей. На высоких частотах роль периодических процессов в формировании спектра акустического излучения двигателя заметно ослабевает, поскольку более значительную роль в суммарном акустическом излучении начинают играть нерегулярные процессы случайного происхождения. В частности, для шума выпуска может оказаться существенной вихревая составляющая. В самом деле, выхлопной тракт двигателя формирует в среде последовательность импульсов давления, частотный спектр которой, в соответствии с существующей теорией спектров излучения [2], представляет собой комбинацию гармонических и широкополосной составляющих.

Экспериментально была установлена приближенная зависимость уровня звуковой мощности ( $L_w$ ) двухтактного поршневого двигателя от частоты вращения коленвала ( $n_{\text{кв}}$ ) двигателя [1]:

$$L_w \sim 40 \lg n_{\text{кв}} \quad (1)$$

Откуда можно получить соотношение для звуковой мощности (W):

$$W \sim n_{\text{КВ}}^4, \quad (2)$$

то есть звуковая мощность поршневого двухтактного двигателя пропорциональна частоте вращения коленвала в степени 4.

Известно [3], что акустическая мощность аэродинамического источника дипольного типа пропорциональна характерной скорости потока в 6-й степени. У малонагруженных воздушных винтов доминирующими по интенсивности излучения являются механизмы генерации дипольного типа (силовое взаимодействие лопасти с окружающей средой), то можно ожидать, что мощность суммарного акустического излучения такого винта также будет пропорциональна характерной скорости в 6-й степени, или числу Маха этой скорости в 6-й степени.

Зависимость акустической мощности шума вращения воздушного винта от эффективной мощности СУ может быть получена на основе полуэмпирической модели шума винта [4], в соответствии с которой, мощность шума вращения описывается выражением:

$$W = \frac{C_1 \rho (\bar{r}_3)^3}{c_0^3} * \left( \alpha^2 + \frac{\beta^2}{(2\pi \bar{r}_3)^2} \right) * \frac{M_r^2}{K_L^3 b_3} * n^6 d^8,$$

где  $n$  – обороты винта;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты тяги и мощности винта,  $d$ ,  $K_L$ ,  $\bar{r}_3$ ,  $b_3$  – диаметр винта, число лопастей, относительный радиус эффективного сечения лопасти и хорда лопасти в эффективном сечении,  $M_r$  – число Маха окружной скорости,  $\rho$  – плотность воздуха,  $c_0$  – скорость звука,  $C_1$  – коэффициент пропорциональности,  $M_{\text{отн}}$  – число Маха относительной скорости потока в концевом сечении лопасти винта.

Принимая во внимание все вышеизложенное можно записать следующее соотношение для суммарной мощности акустического излучения от поршневого двигателя и от малонагруженного винта:

$$W \sim N_e^2, M_{\text{отн}}^6, \quad (3)$$

Наиболее общей характеристикой источника акустического излучения аэродинамического типа является акустический коэффициент полезного действия - относительная мера количества механической энергии силовой установки, излучаемой в виде акустической энергии.

$$\eta_{\text{ак}} = \frac{W}{N_e} \times 100\% \quad (4)$$

Где  $W$  - мощность акустического излучения,  $N_e$  – эффективная мощность СУ.

Таким образом, если в шуме СУ, включающей в себя двухтактный поршневой двигатель и воздушный винт, доминирует акустическое излучение от двигателя, то при обработке экспериментальных данных следует ожидать зависимость звуковой мощности от оборотов коленвала в степени близкой к четвертой. Если доминирует излучение от воздушного винта, то следует ожидать зависимости звуковой мощности от эффективной мощности СУ в степени 2 и от окружной скорости винта в степени 6.

### ***Акустические характеристики СУ БПЛА***

В настоящей работе изложены основные результаты акустических испытаний малоразмерного БПЛА, общий вид и схема расположения которого в рабочей части аэродинамической трубы (АДТ) ЦАГИ Т-104 представлена на рисунке 2. В

помещении рабочей части АДТ реализовывалось реверберационное акустическое поле, однако уровень реверберационных помех в местах расположения приемников звукового давления был ниже уровней гармонических составляющих шума испытываемой силовой установки на величину не менее 10 дБ. Это позволяло уверенно выделять полезный сигнал на фоне помех и практически исключить влияние реверберации на измеряемые уровни гармонических составляющих в спектре шума СУ.

Винто-моторная силовая установка БПЛА расположена в хвостовой части ЛА. Силовая установка состоит из двухтактного поршневого двигателя воздушного охлаждения П-032М и винто-кольцевого движителя (ВКД), включающего профилированное кольцо и толкающий винт фиксированного шага АВ-23М4 диаметром  $D_v=0,606\text{м}$ . На двигателе установлен редуктор, коэффициент редукции которого равен  $\approx 2,102$ .

Система выхлопа двигателя организована таким образом, что выхлопные газы выбрасываются через два патрубка, расположенных вблизи комлевых сечений лопастей винта, и проходят через плоскость вращения винта.

Акустические испытания проведены для трех режимов работы силовой установки БПЛА: малый газ (МГ), крейсерский режим (КР), режим полного газа (ПГ). На каждом режиме работы двигателя изменялась скорость потока в рабочей части аэродинамической трубы в диапазоне значений от 15м/с до 50м/с с шагом 5м/с.





Рисунок 2 – Схема размещения БПЛА в рабочей части АДТ Т-104

Объем акустических измерений соответствовал 120 режимам совместной работы силовой установки и аэродинамической трубы. При этом измерялось звуковое давление в 5-ти точках акустического поля. Схема расположения точек измерения шума показана на рисунке 3.

Измерительные точки расположены в горизонтальной плоскости, проходящей через продольную ось малоразмерного БПЛА, на линии параллельной оси АДТ.

Для регистрации акустических измерений и последующей обработки данных использовалась измерительная система "PORTABLE". Основные параметры регистрации сигнала на цифровом магнитофоне: частота квантования сигнала – 51200 Гц, протяженность записи на одном режиме – 14,88 с., регистрация полезного сигнала осуществлялась параллельно с 5-ти измерительных каналов. Обработка измеренного звукового давления включала в себя получение узкополосных спектров с шириной полосы 2 Гц в диапазоне частот 0-128000 Гц, третьоктавных спектров звукового давления в диапазоне частот 16-10000 Гц.

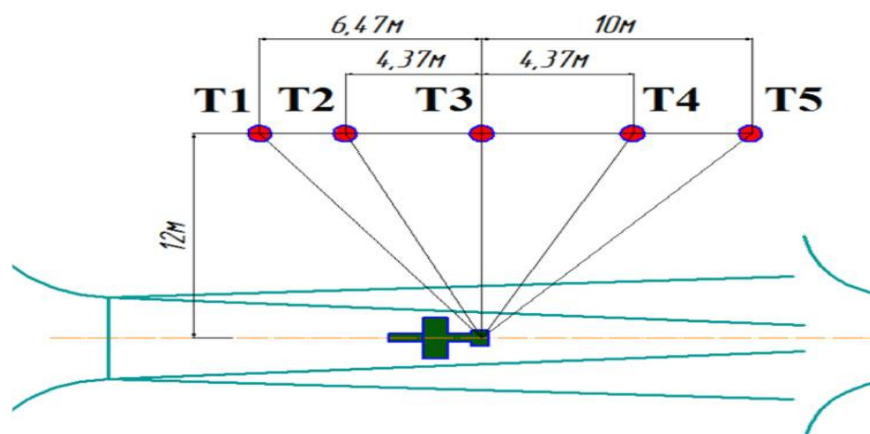


Рисунок 3 - Схема расположения точек измерения шума БПЛА в рабочей части АДТ

Энергетические и интегральные характеристики акустического излучения СУ

На рисунке 4 представлена зависимость суммарного уровня звукового давления ( $L_{\Sigma}$ ) при различных режимах работы двигателя при отсутствии потока в АДТ в зависимости от частоты вращения коленвала двигателя. Из рисунка 4 видно, что с увеличением режима работы СУ, суммарный уровень звукового давления увеличивается.

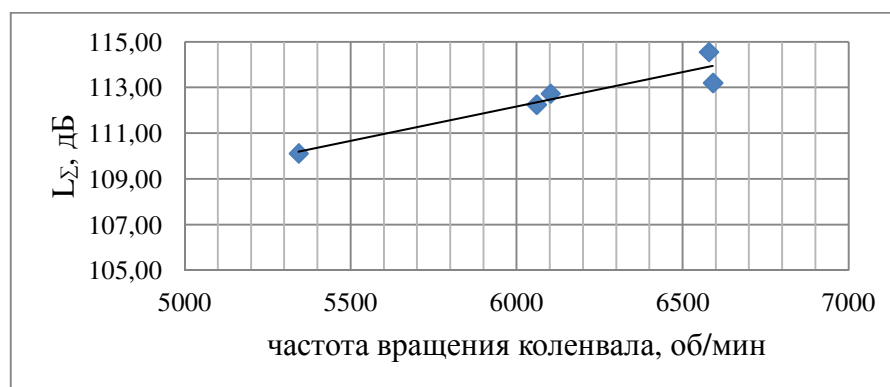


Рисунок 4 – Зависимость суммарного уровня звукового давления от частоты вращения коленвала двигателя при отсутствии потока ( $V_{\text{АДТ}}=0$  м/с)

Представленные на рисунке 4 данные соответствуют следующей зависимости интенсивности акустического излучения СУ от частоты вращения коленвала двигателя:

$$I \sim n_{\text{КВ}}^{4,14} \quad (5)$$

На рисунке 5 показана экспериментальная зависимость акустического КПД СУ БПЛА от оборотов коленвала. Можно видеть, что максимальное значение акустического КПД соответствует максимальной частоте вращения коленвала двигателя и составляет  $\approx 1.1\%$ . С уменьшением режима работы акустический КПД уменьшается практически по линейному закону и составляет  $\approx 0.44\%$  на минимальном режиме работы.

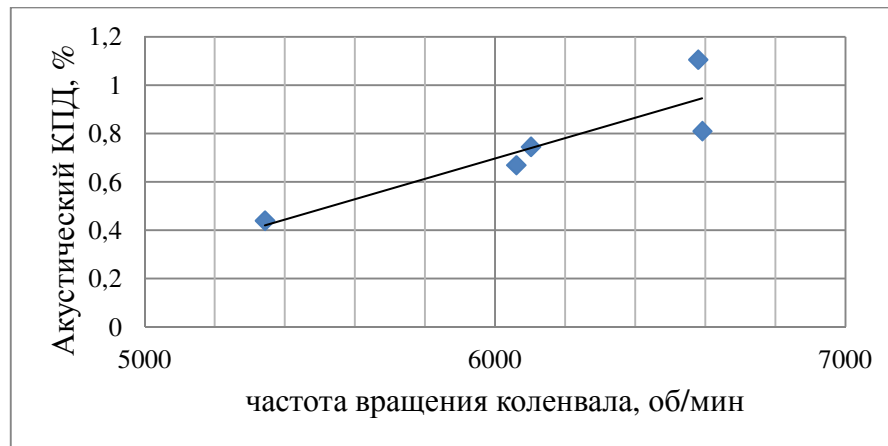


Рисунок 5 – Зависимость акустического КПД от частоты вращения коленвала двигателя при отсутствии потока ( $V_{\text{АДТ}}=0$  м/с)

Полученное значение акустического КПД на режиме максимальной мощности СУ (1,1%) значительно превышает аналогичный показатель для легкого винтового самолета Як-18Т (0,15%) [5], в состав СУ которого входит четырехтактный поршневой двигатель М-14П. Возможно, столь высокое значение акустического КПД связано с высоким уровнем звуковых вибраций, а также с высокой тепловой и механической напряженностью деталей двухтактного двигателя.

Параметром, определяющим комплексную напряженность (тепловую и механическую) деталей двигателя, является поршневая мощность  $N_{\text{п}}$  (кВт/дм<sup>2</sup>), которая представляет собой эффективную мощность, приходящуюся на единицу площади всех поршней. Этот параметр тесно связан с литровой мощностью  $N_{\text{л}}=N_{\text{п}}S$ , где  $S$ -ход поршня. Поэтому в двухтактных двигателях тепловая и механическая напряженность деталей значительно выше, чем в четырехтактных ДВС, и ожидаемый уровень шума двухтактного двигателя будет выше, чем четырехтактного.

Полученная зависимость интенсивности акустического излучения от частоты вращения коленвала (5) свидетельствует о том, что доминирующим источником шума СУ БПЛА является двухтактный поршневой двигатель.

Результаты оценки суммарных уровней гармонических составляющих шума винта и двигателя, и суммарного уровня шума силовой установки ( $L_{\Sigma \text{ТО}}$ ) в целом, полученные по узкополосным и третьоктавным спектрам для диапазона частот 50-1000 Гц, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Суммарные уровни гармонических составляющих акустического излучения винта и двигателя в диапазоне частот 50-1000 Гц

№ п/п		МГ, V=0	КР1, V=0	КР2, V=0	ПГ1, V=0	ПГ2, V=0	МГ, V=50	КР, V=50	ПГ, V=50
1	$L_{\Sigma, TO}$ , дБ	110	112.6	112.2	114.5	113.1	112.3	113.6	113.6
2	$L_{\Sigma, Г}$ , дБ	109.2	110.6	110.1	113.0	111.7	110.7	112.9	112.2
3	$L_{\Sigma, Г-дв}$ , дБ (нечетн. гарм.)	103.7	105.2	105.4	110.2	108.8	104.7	109.8	109.9
4	$L_{\Sigma, Г-винт+двиг}$ , дБ (четн. гарм.)	107.8	109.1	108.3	109.8	108.7	109.5	110.1	108.4
5	$L_{\Sigma, Г-дв}$ , дБ (нечетн. и четн. гарм.)	106.7	108.2	108.4	113.2	111.6	107.4	112.8	112.9
6	$L_{\Sigma, Г-винт}$ , дБ (четные гарм.) (4)-(5)	105.8	106.8	105.2	100	98	107.8	100	-
7	$\Delta L_{\Sigma, Г, дв, -винт}$ , дБ (5)-(6)	0.9	1.4	3.2	13	13.6	-0.4	12.8	-

Здесь  $V$ - скорость воздушного потока в рабочей части АДТ (м/с), (1) -  $L_{\Sigma, TO}$  – измеренный суммарный по третьоктавному спектру излучения СУ БПЛА уровень звукового давления; (2) -  $L_{\Sigma, Г}$  – суммарный уровень гармонических составляющих в спектре излучения СУ БПЛА в диапазоне частот 50-1000 Гц; (3) -  $L_{\Sigma, Г-винт+двиг}$  – суммарный уровень гармонических составляющих шума винта и двигателя на четных гармониках; (4) -  $L_{\Sigma, Г-дв, (нечетн. гарм.)}$  – суммарный уровень гармонических составляющих излучения двигателя на нечетных гармониках; (5) -  $L_{\Sigma, Г-дв, (нечетн. и четн. гарм.)}$  – суммарный уровень гармонических составляющих излучения двигателя (на нечетных и четных гармониках); (6) -  $L_{\Sigma, Г-винт, (четные гарм.)}$  - суммарный уровень гармонических составляющих излучения винта (на четных гармониках); (7) -  $\Delta L_{\Sigma, Г, (дв, -винт)}$  – разность между суммарными уровнями гармонических составляющих шума двигателя и винта в диапазоне частот 50-1000 Гц.

Для разделения вклада гармонических составляющих шума двигателя и винта в суммарный уровень шума от всех гармоник акустического излучения СУ БПЛА в диапазоне частот 50-1000 Гц, используется следующий алгоритм:

$$L_{\Sigma\Gamma} = 10 \log \sum_{i=1,2,3,\dots}^{10} 10^{L_{\Gamma,i}/10},$$

$$L_{\Sigma,\Gamma\text{-дв. (нечетн. и четн. гарм.)}} = [L_{\Sigma,\Gamma\text{-дв. (нечетн.)}} + L_{\Sigma,\Gamma\text{-дв. (четн.)}}],$$

$$L_{\Sigma,\Gamma\text{ винт, дБ (четные гарм.)}} = [L_{\Sigma,\Gamma} - L_{\Sigma,\Gamma\text{-дв. (нечетн. и четн. гарм.)}}],$$

здесь [ ] – операция энергетического суммирования (вычитания) уровней звукового давления;  $i$  – номер гармоники в спектре излучения. При оценках, представленных в таблице 1, полагалось, что гармонические составляющие излучения с нечетными номерами обусловлены излучением двигателя, с четными номерами – излучением и двигателя и винта, так как частоты гармоник шума выхлопа с четными номерами близки частотам гармоник шума винта. Также предполагалось, что уровни гармонических составляющих излучения двигателя на соседних нечетных и четных гармониках одинаковы.

Представленные в таблице 1 данные о суммарных уровнях гармонического излучения двигателя и винта СУ БПЛА в диапазоне частот гармоник 50-1000Гц свидетельствуют о следующем.

При отсутствии потока в АДГ ( $V_{\text{АДГ}}=0$ ) суммарный уровень звукового давления от гармонического излучения двигателя, как правило, превышает суммарный уровень гармоник шума винта (рисунок 6). Причем на режиме полного газа (обороты коленвала свыше 6500 об/мин) это превышение становится доминирующим. При скорости внешнего потока  $V_{\text{АДГ}}=50\text{м/с}$  эта тенденция

сохраняется, причем доминирование гармонического излучения от двигателя проявляется уже с крейсерского режима.

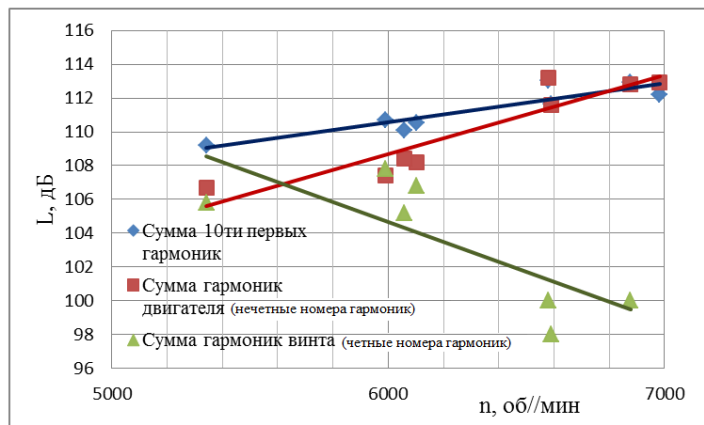


Рисунок 6 - Сравнение зависимостей суммарного уровня звукового давления для 10-ти первых гармоник, для суммы уровней гармоник двигателя и для суммы уровней гармоник винта (в диапазоне частот гармоник 50-1000Гц) в зависимости от частоты вращения коленвала двигателя

Как видно из данных на рисунке 7, где показано соотношение между суммарным уровнем звукового давления по всему спектру излучения, и суммарным уровнем первых 10-и гармоник гармонической составляющей излучения, средняя разность между ними составляет примерно 1.5 дБ при всех рассматриваемых режимах работы силовой установки. Эта разность обусловлена наличием в спектре излучения широкополосной составляющей.

Полагая, что сумма уровней первых 10-и гармоник практически определяет интенсивность всего гармонического излучения, то, в соответствии с правилом энергетического суммирования уровней, уровень звукового давления от широкополосного излучения будет на 6 дБ ниже уровня суммарного сигнала, или на 4.5 дБ ниже суммарного уровня гармонического излучения. И это соотношение будет справедливо для всех рассматриваемых режимов работы СУ БПЛА.

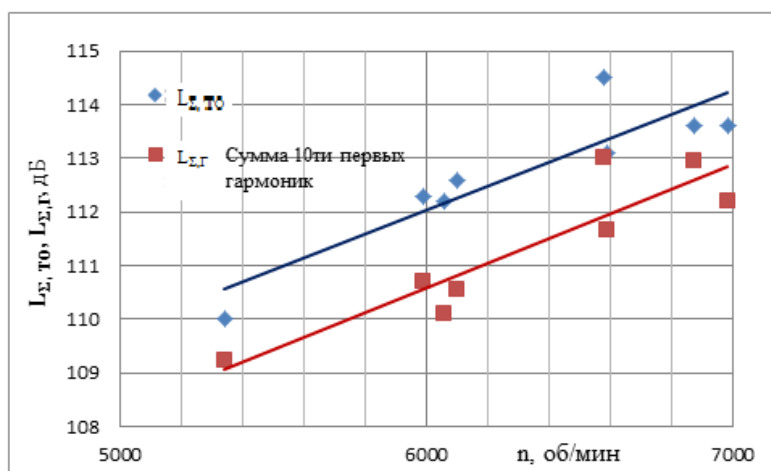


Рисунок 7 – Сравнение зависимостей от частоты вращения коленвала суммарных уровней звукового давления по всему спектру акустического излучения и суммарных уровней для первых 10-ти гармоник шума

Рассмотрим теперь вклад различных источников излучения в общий шум СУ БПЛА. На режиме малого газа интенсивность гармонического излучения от выхлопа двигателя и от воздушного винта примерно одинакова (вклад первых 5-ти гармоник винта в суммарную интенсивность акустического излучения ~38%). На крейсерском режиме уровень интенсивности гармонического излучения от выхлопа двигателя примерно на 2-3 дБ выше уровня интенсивности гармонического излучения от винта, что соответствует вкладу винта в суммарную интенсивность акустического излучения ~23%. На режиме полного газа уровень интенсивности гармонического излучения от выхлопа двигателя превышает уровень интенсивности гармонической составляющей шума вращения винта на 12-13 дБ, и вклад винта в суммарное акустическое излучение составляет ~3%.



## Спектральные характеристики акустического излучения СУ

Типичный спектр акустического излучения при работе силовой установки малоразмерного ЛА на крейсерском режиме (КР) в аэродинамической трубе Т-104 и при наличии потока в рабочей части приведен на рисунке 8. Спектр излучения содержит «частокол» дискретных составляющих, максимумы огибающих которых располагаются в области средних частот 200-700 Гц, в области частот 1000-2500 Гц и в области высоких частот 4-5 кГц и 6-7 кГц. Кроме этого можно выделить область низких частот (ниже частоты  $\approx 100$  Гц), где присутствует только широкополосное акустическое излучение.

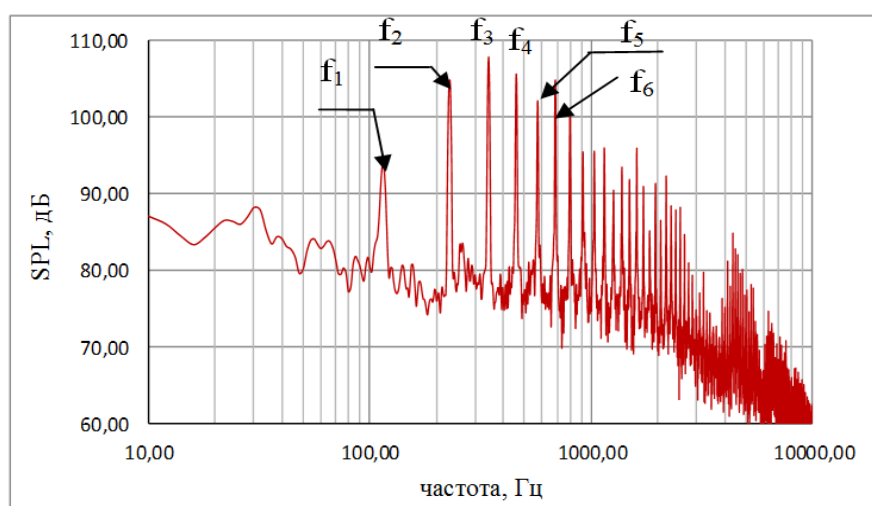


Рисунок 8 – Узкополосный спектр акустического излучения при работе силовой установки БПЛА на режиме КР ( $V_{\text{АДТ}} = 50.7$  м/с,  $n_{\text{КВ}} = 6876$  об/мин)

Частота всех гармоник кратна оборотам коленвала двигателя (роторной частоте). Максимальный уровень звукового давления соответствует 3-й гармонике излучения. Номера гармоник, частоты и уровни первых 11-ти гармоник приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Гармоники спектра излучения СУ БПЛА на режиме КР

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_r$ , Гц	114	228	342	458	572	686	798	914	1028	1142	1256
$L_r$ , дБ	93.8	104.7	106.8	105.6	102.1	104.7	97.6	94.4	93.4	94.5	88.6

Для данного значения оборотов коленвала расчетная частота выхлопа 2-х цилиндрического 2-х тактного двигателя составляет 114 Гц. Частота первой гармоники шума винта (с учетом коэффициента редукции) для 4-х лопастной компоновки  $\approx 228$  Гц. Первые шесть гармоник шума СУ обозначены на рисунке 8 -  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ . Частоты гармоник шума выхлопа с четными номерами (2,4,6...) близки частотам гармоник шума винта и полагается, что уровни четных гармоник шума обусловлены акустическим излучением и винта, и двигателя.

Уровни гармонических составляющих шума винта и двигателя уже не выделяются на фоне широкополосного шума на частотах свыше 2,5 кГц. Максимумы гармонических составляющих шума СУ БПЛА в области частот свыше 3 кГц, возможно, связаны с шумом механического происхождения - излучением от шестерен редуктора двигателя и других внутренних кинематических элементов (перекладка поршней, подшипники коленвала, шестерни привода насоса и т.п.).

Характер изменения уровней гармоник с нечетными номерами по частоте на рисунке 8 свидетельствует в пользу того, что доминирующим источником данного гармонического излучения является двигатель, а смещение спектрального максимума на частоту третьей гармоники говорит об импульсном характере излучения.

Влияние режима работы силовой установки БПЛА на узкополосный и третьоктавный спектр акустического излучения при отсутствии потока в аэродинамической трубе показано на рисунке 9. Для режима малого газа спектр излучения смещен в сторону низких частот, по сравнению с крейсерским режимом, что связано с различием в оборотах коленвала двигателя на этих режимах. При этом уровни соответствующих гармоник с нечетными номерами (1,3,5..) на рассматриваемых режимах, по крайней мере, в области частот до 1000 Гц, отличаются друг от друга на 2-3 дБ. В то же время на 1-й гармонике шума винта (на рисунках – это первая гармоника с четным номером) разница в уровнях составляет ~ 10 дБ. Такая же тенденция сохраняется и при наличии потока в трубе.

Это показывает, что в гармониках с четными номерами доминирует акустическое излучение от винта – на крейсерском режиме интенсивность гармонического излучения винта должна быть ниже по сравнению с режимом малого газа ввиду более высокого КПД винта на расчетном режиме работы.

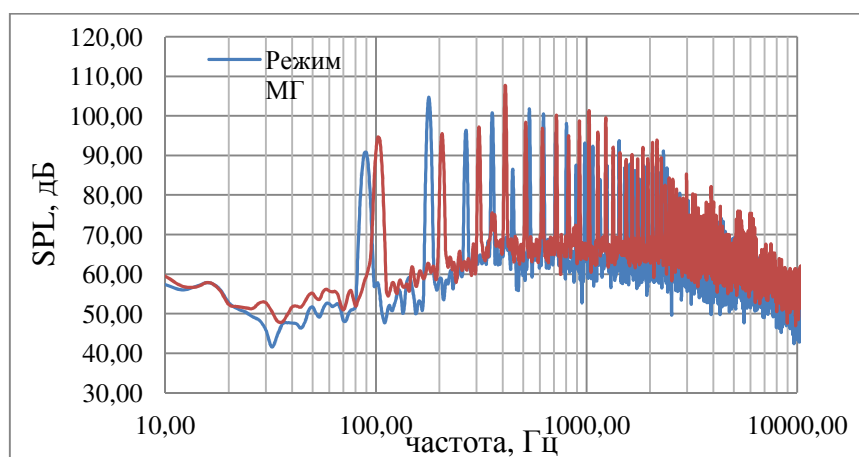


Рисунок 9а– Узкополосные спектры шума силовой установки БПЛА на режимах МГ и КР при отсутствии потока в АДТ ( $V_{\text{АДТ}} = 0\text{ м/с}$ )

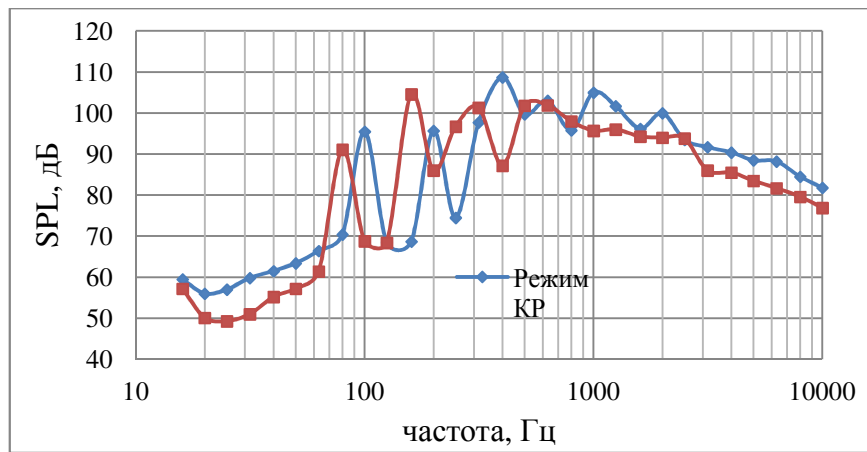


Рисунок 9б – Третьооктавные спектры шума силовой установки БПЛА на режимах МГ и КР при отсутствии потока в АДТ ( $V_{\text{АДТ}} = 0 \text{ м/с}$ )

Ранее было отмечено, что для двухтактных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания интенсивность акустического излучения пропорциональна оборотам коленвала двигателя в степени 4:  $I \sim n_{\text{КВ}}^4$ . На режимах МГ и КР при  $V_{\text{АДТ}}=0$  м/с обороты двигателя равны, соответственно, 5343 об/мин и 6102 об/мин. Изменение частоты вращения коленвала двигателя в данных пределах должно соответствовать изменению в уровнях гармонических составляющих на 2.3 дБ. Как видно из спектров звукового давления, приведенных на рисунке 9а, именно такое изменение в уровнях звукового давления мы имеем на первых нескольких гармониках с нечетными номерами (гармоники шума двигателя).

Влияние скорости воздушного потока на спектр акустического излучения СУ БПЛА рассмотрено на рисунках 10-11.

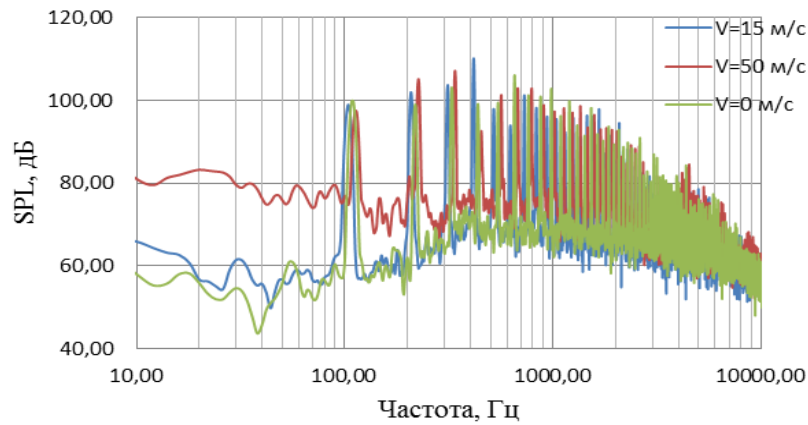


Рисунок 10 – Узкополосные спектры акустического излучения СУ БПЛА на крейсерском режиме работы при различной скорости потока в АДТ

Широкополосное излучение имеет, по крайней мере, две составляющие, обусловленные генерацией излучения турбулентным потоком аэродинамической трубы и генерацией излучения силовой установкой БПЛА. При скоростях внешнего потока до 15 м/с спектр излучения турбулентного потока выделяется на частотах ниже частоты первой гармоники (рисунок 10), а на частотах выше частоты 1-й гармоники спектр широкополосного шума эквидистантен огибающей гармонического спектра. Это свидетельствует об импульсном характере излучения гармонической и широкополосной составляющих шума СУ БПЛА в области частот, включающей первые 10-15 гармоник шума. При скорости внешнего потока 50 м/с спектр широкополосного излучения выделяется в области частот, по крайней мере, до 200 Гц.

Спектры акустического излучения в третьоктавных полосах частот, соответствующие различной скорости внешнего потока, показаны на рисунке 11. Можно видеть, что на частотах выше 1000 Гц спектральные уровни практически не

зависят от скорости потока воздуха в АДТ, что свидетельствует об их связи с акустическим излучением поршневого двигателя.

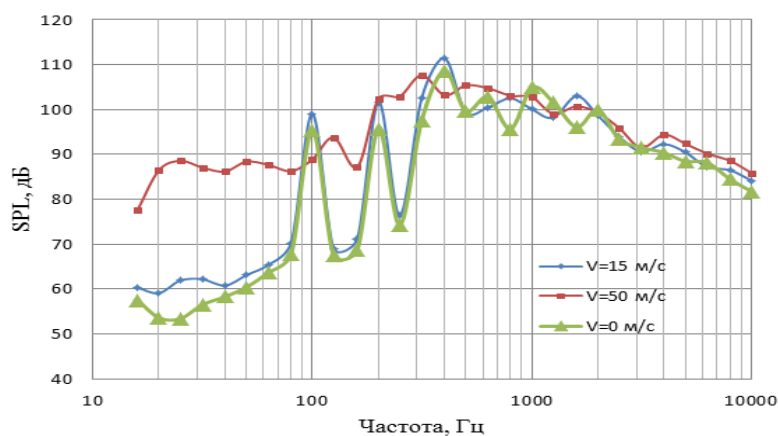


Рисунок 11 - Спектры акустического излучения СУ БПЛА в третьоктавных полосах частот при различной скорости внешнего потока (режим КР)

На частотах ниже частоты первой гармоники спектральные уровни зависят от скорости потока воздуха в АДТ – чем выше скорость, тем выше уровень звукового давления, что свидетельствует об их связи с акустическим излучением от турбулентного потока в открытой рабочей части АДТ.

### *Заключение*

Таким образом, в результате экспериментального исследования в аэродинамической трубе акустического излучения от силовой установки малоразмерного БПЛА с винто-кольцевым движителем установлено, что суммарный уровень шума СУ БПЛА определяется, в основном, первыми 10-ю гармониками шума двигателя и первыми 5-ю гармониками шума вращения винта. Вклад первых пяти гармоник шума вращения винта в суммарную интенсивность акустического излучения СУ БПЛА составляет на режиме малого газа ~38%, на

крейсерском режиме ~23%, на режиме полного газа ~3%. Акустический КПД на режиме максимальной мощности СУ составляет ~1,1%.

Суммарный спектр излучения обусловлен несколькими гармоническими и широкополосными составляющими. Спектр включает в себя: гармонические составляющие излучения от двигателя; гармонические составляющие шума вращения винта (область частот ниже 2.5 кГц); гармонические составляющие излучения механического происхождения (область частот выше 3 кГц); высокочастотную составляющую шума двигателя с непрерывным по частоте спектром (область частот выше 1 кГц), и низкочастотную составляющую излучения с непрерывным по частоте спектром (область частот ниже 100 Гц), источником которой является турбулентный поток в рабочей части трубы.

На основании выполненного исследования можно констатировать, что в шуме силовой установки БПЛА, включающей поршневой двигатель воздушного охлаждения и винто-кольцевой движитель, при отсутствии в выхлопном тракте двигателя глушителя шума выхлопа, определяющим источником внешнего шума является поршневой двигатель.

### **Библиографический список**

1. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания./ В.М.Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тупов и др.- М.:Машиностроение, 1990.-272 с.
2. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Гос. изд-во технико-теор. лит-ры. М.,1957.- 234 с.

3. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. Изд-во «Наука». М., 1966.- 521 с.
4. Самохин В.Ф. Об одном подходе к расчету дальнего акустического поля воздушного винта. Труды ЦАГИ, 1988, вып. 2355, стр. 65-75.
5. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания. Электронный журнал «Труды МАИ», 2012. вып. №57:<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715>  
(дата публикации 30.06.2012).