
УДК 621.43:629.7.03.035

Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания

Самохин В.Ф., Мошков П.А.

Аннотация

В статье рассмотрена проблема шума на местности легких винтовых самолетов (ЛВС), дан краткий обзор механизмов генерации шума винтом и двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и существующих аналитических моделей шума воздушного винта. Представлены основные результаты экспериментального исследования акустических характеристик легкого винтового самолета типа Як-18Т в статических условиях. Приведены пространственно-временные, спектральные и энергетические характеристики акустического излучения силовой установки ЛВС. Выявлен новый механизм генерации дозвуковым воздушным винтом акустического излучения импульсного типа. Установлено, что акустическая мощность силовой установки ЛВС определяется мощностью суммарного акустического излучения воздушного винта и двигателя. Акустический КПД силовой установки ЛВС типа Як-18Т в стационарных условиях составляет $\approx 0,15\%$.

Ключевые слова:

шум воздушного винта; шум двигателей внутреннего сгорания; шум легких винтовых самолетов.

Введение

В последние два десятилетия получили развитие новые направления авиационной науки, связанные с обеспечением требуемого уровня акустических характеристик беспилотных ЛА, в том числе и БПЛА с винтовыми движителями. Возникла новая проблема, связанная с обеспечением пониженного уровня акустической заметности БПЛА. Решение этой проблемы базируется на создании малозумных малонагруженных воздушных винтов и

на разработке новых принципов аэродинамической компоновки ЛА. Проблема снижения шума малонагруженных воздушных винтов является весьма актуальной и для лёгких винтовых самолетов общего назначения, поскольку действуют нормы ИКАО на предельно допустимые уровни шума таких самолетов на местности [1]. Проблеме шума воздушного винта и двигателя внутреннего сгорания посвящено значительное количество исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом в прошлом веке. 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 ЛВС и 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, работа толкающего винта в условиях сильно турбулизованной внешней среды, и т.п. Кроме того для малоразмерных ЛА при анализе структуры акустического поля оказывается важным комплексный подход, учитывающий суммарное акустическое поле винтового движителя и 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 проблем экологии ЛВС и задач акустической заметности малоразмерных аппаратов.

1. О шуме ЛА с винтовым движителем

Движение ЛА в воздушной среде сопровождается образованием и распространением в окружающее пространство акустического поля, источником которого является силовая установка и планер ЛА. При этом по интенсивности доминирует акустическое излучение от силовой установки, включающей ДВС и воздушный винт. Основные источники акустического излучения ЛВС перечислены на рисунке 1.

Шум двигателя внутреннего сгорания обусловлен, в основном, излучениями, образуемыми в процессе горения топлива и создании и передаче крутящего момента внутри двигателя. Шум винта образуется в процессе создания тяги посредством силового взаимодействия лопастей с окружающей средой.



Рисунок 1 - Структурная схема составляющих шума легкого винтового самолета

Воздушный винт

Акустическое излучение воздушного винта является сложным по своей структуре, а причины, вызывающие генерацию акустического излучения, весьма разнообразны. Помимо того, что лопасти винта оказывают периодическое силовое воздействие на окружающую среду и это приводит к излучению гармонической составляющей *шума 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*. Кроме того, лопасти винта при его вращении могут периодически проходить вблизи каких-либо элементов конструкции самолета или же попадать в турбулентный след за этими элементами. При этом генерируется излучение в виде периодической последовательности импульсов давления, которой соответствует гармонический спектр. Частоты отдельных гармоник этого спектра кратны произведению числа оборотов в секунду n на число лопастей z : $f_m = mnz$, где f_m — частота m -й гармоники.

Гармоническую составляющую шума называют обычно *шумом вращения*. Шум вращения, в свою очередь, можно разделить на две составляющие. Одна из них обусловлена воздействием на среду стационарных относительно лопастей аэродинамических нагрузок — силы тяги и силы сопротивления вращению винта. Эти составляющие эквивалентны акустическому диполю. Вторая составляющая *шума вращения* связана с конечной толщиной лопасти. Лопасть при вращении вытесняет из окружающей среды объем, равный объему лопасти, который затем вновь заполняется средой. Происходит периодическое вытеснение объема среды в любой фиксированной точке пространства, находящейся в области диска

винта. Таким образом, элементарные объемы в каждой точке пространства в области диска винта пульсируют с той же частотой, что и частота шума вращения при воздействии на среду установившихся аэродинамических нагрузок на лопасти. Эту составляющую шума вращения называют обычно *объемным шумом* или *шумом вытеснения*. *Объемный шум* эквивалентен простому акустическому источнику - монополю. Интенсивность *объемного шума* зависит от толщины набора профилей лопасти и от относительной скорости потока, обтекающего лопасть.



Рис. 2 Типичный спектр шума воздушного винта

Вихревой шум, образующийся в результате пульсаций аэродинамического давления на поверхности лопасти и турбулентных пульсаций скорости потока в вихревой пелене, имеет сплошной спектр, поскольку пульсации давления и скорости носят случайный характер, а их распределение по частоте является непрерывным. С каждой лопасти отходит сплошная и непрерывная по радиусу вихревая пелена. Интенсивность звукового давления, обусловленного излучением вихревой пелены, при применении в лопастях современных аэродинамических профилей относительно не велика, поэтому уровень вихревого шума также незначителен. Обычно интенсивность вихревого шума на 15—20 дБ ниже уровня гармоник шума вращения (рисунок 2), а максимум его спектра находится в области сравнительно высоких частот.

Теоретические методы расчета акустического поля воздушного винта базируются, в основном, на известной модели Л.Я.Гутина [2,3], в соответствии с которой реальный винт заменяется непрерывным распределением точечных источников в плоскости диска. Дальнейшее развитие этой теоретической модели [4,5,6] шло в направлении перехода от

сосредоточенной аэродинамической нагрузки к нагрузке, распределенной по поверхности лопасти, и учету эффектов, связанных с поступательным перемещением винта. Вместе с тем отсутствие надежных методов расчета амплитудных и фазовых характеристик гармоник нагружения лопастей воздушного винта сдерживает применение теоретических методов на практике.

Достаточно гибким в практическом применении показал себя полуэмпирический метод расчета дальнего акустического поля винта [7], основанный на использовании акустической аналогии Лайтхилла для излучения звука потоком в присутствии жестких границ. В основу расчетной модели положена гипотеза Л.Я.Гутина о допустимости представления действующей на лопасть винта распределенной аэродинамической нагрузки в виде сосредоточенной силы, и гипотезы Г.Лэмба [8] о том, что следствием действия периодической сосредоточенной силы на бесконечно малый объем среды является появление безвихревого движения среды вне области действия силы, то есть появление звуковых волн.

Двигатель внутреннего сгорания

Двигатель внутреннего сгорания относится к интенсивным источникам звука аэродинамического и механического происхождения. Создание крутящего момента на валу двигателя связано с быстропротекающим во времени процессом горения топливно-воздушной смеси в камерах сгорания. Процесс горения топливной смеси является аэродинамическим источником интенсивного акустического излучения. Кроме того, двигатель состоит из большого числа механических деталей, которые при резких возвратно-поступательных движениях поршневой группы получают значительные ускорения, что является источником излучения механического типа.

Суммарный шум двигателя внутреннего сгорания (рисунок 1), включающий шум выхлопа, шум всасывания и шум, излучаемый непосредственно через стенки двигателя, обычно рассматривается отдельно для каждой из составляющих, поскольку они характеризуются разными условиями распространения образовавшегося в двигателе переменного поля давления.

Шум на срезе выхлопной трубы формируют два различных процесса. Низкочастотная и среднечастотная части спектра (до 500 Гц) излучения соответствуют процессами, происходящими в камерах сгорания. Этот шум распространяется в атмосферу через

выпускные клапаны и выхлопную трубу. Уровень звукового давления на выходе из выхлопной трубы достигает на отдельных частотах 110-120 дБ. Частоты, которым соответствует излучение звука максимальной интенсивности, связаны с основной частотой работающего двигателя и ее гармониками. Высокочастотная часть спектра (1000 Гц и более) обязана процессу истечения газов из выхлопной трубы.

Шум всасывания обусловлен колебательным движением газов во впускном коллекторе и сопровождается значительными амплитудами давления. Основное влияние на шум впуска оказывает частота вращения вала двигателя (увеличение скорости вращения на 1000 об/мин приводит к повышению уровня звукового давления на всасывании на 5—15 дБ).

Шум, излучаемый двигателем через корпус, обусловлен, с одной стороны, процессами сгорания топлива в цилиндрах, с другой стороны, механическими процессами (удары клапанов, перекладка поршней, удары топливного насоса при впрыскивании топлива, зубчатыми зацеплениями приводов).

Основными мероприятиями, используемыми на практике для снижения уровня шума на входе и выходе двигателя являются: целенаправленный подбор последовательности работы цилиндров, обеспечение плавности открытия и закрытия клапанов и особенно – применение специальных глушителей во впускном и выпускном каналах двигателя. Для снижения шума, излучаемого непосредственно через корпус двигателя, используются следующие мероприятия:

- обеспечение требуемой мощности при минимально возможной частоте вращения;
- выравнивание во времени процесса горения топлива;
- уменьшение зазора между поршнем и стенкой цилиндра;
- применение специальных конструкций газораспределительного механизма;
- улучшение балансировки двигателя.

Следует заметить, что акустическая эффективность каждого из перечисленных мероприятий ограничена, и существенного эффекта можно достигнуть за счет их комплексного применения.

2. Исследование акустических характеристик легкого винтового самолета

Выполнены измерения акустических характеристик легкого винтового самолета типа ЯК-18Т. Силовая установка самолета включает в себя ДВС с воздушным охлаждением типа М-14П и 2-х лопастной воздушный винт типа В535-Д35. Измерения проводились при гонке

силовой установки самолета в статических условиях. Измерения осуществлялись в горизонтальной плоскости в ближнем поле винта и на окружности радиусом 30 м, центр которой совпадал с проекцией центра винта на земную поверхность. Ось винта самолета Як-18Т удалена от поверхности земли на расстояние 1,36 м (диаметр винта - 2,4 м, клиренс относительно поверхности земли - 0,16 м). Измерительные точки располагались на окружности с шагом 10 градусов в диапазоне углов 0-160 (рисунок 3). Микрофон располагался на уровне поверхности земли, причем его продольная ось была направлена на источник шума. Наземные испытания осуществлялись при пяти режимах работы силовой установки, соответствующих относительным оборотам коленвала двигателя 100%, 82%, 70%, 64%, 59%. В измерениях использовался комплект электроизмерительной аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер».

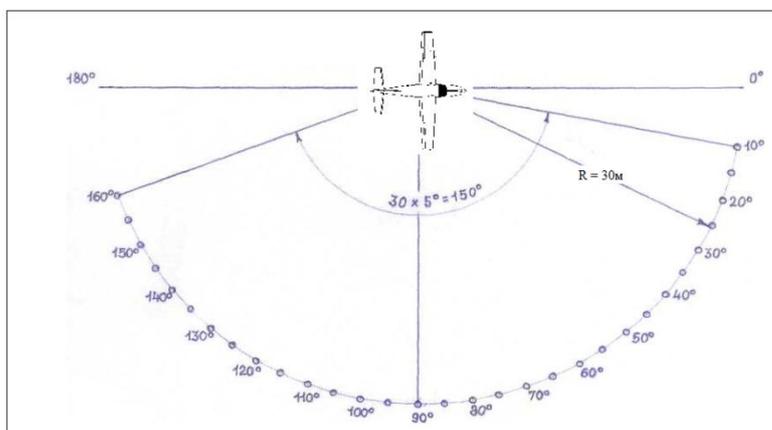


Рисунок 3 – Схема акустических испытаний самолета в статических условиях

Измерения в ближнем акустическом поле силовой установки самолета Як-18Т в статических условиях показали наличие интенсивного импульсного излучения (рисунок 4) у малонагруженного винта на режиме работы с существенно дозвуковой окружной скоростью концов лопастей ($M_{\text{окр}} = 0,664$.)

Частота следования импульсов равна ~ 60 Гц (181,5 мс), что соответствует частоте следования лопастей винта. Импульсное излучение появляется у воздушного винта при работе его вблизи жесткой поверхности и обусловлено периодическим образованием локальной области повышенного давления в концевой части лопасти при прохождении ее вблизи земли. Временная реализация импульсного излучения дозвукового воздушного винта в передней ($\varphi=0^\circ$) полусфере самолета (рисунок 4) имеет вид последовательности импульсов

сжатия, а в задней полусфере в направлении $\varphi=110^\circ$ - вид последовательности знакопеременных импульсов.

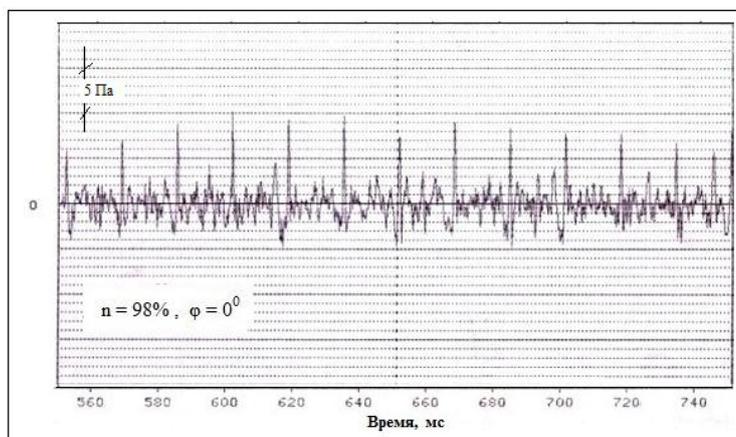


Рисунок 4 – Временная реализация звукового давления в ближнем акустическом поле винта самолета Як-18Т

В типовом спектре звукового давления в узких ($\Delta f = 6$ Гц) полосах частот (рисунок 5) отчетливо выделяются гармонические составляющие, частоты которых соответствуют гармоникам частот следования лопастей винта и излучению двигателя на дискретных частотах.

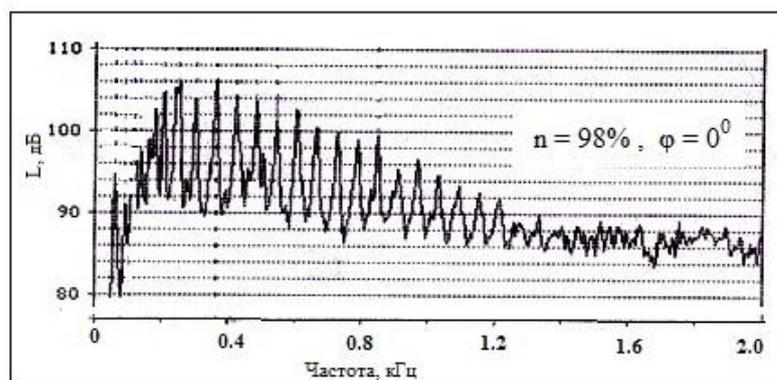


Рисунок 5 – Спектр уровней звукового давления в ближнем поле винта самолета Як-18Т

Данные о направленности акустического излучения силовой установки самолета в зависимости от режима её работы представлены на нормализованных характеристиках направленности (рисунок 6), построенных для интегральных по спектру излучения уровней

звукового давления. При пониженном режиме работы двигателя ($N_e = 132,4$ кВт) характеристика направленности имеет характерные максимумы в направлениях $\varphi = 70^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$. Установлено, что 1-я гармоника шума вращения винта ($f_b = 40$ Гц) имеет максимум интенсивности в направлениях $\varphi = 70^\circ$ и $\varphi = 100^\circ$, 1-я гармоника шума выхлопа двигателя ($f_d = 125$ Гц) имеет максимум интенсивности в направлении $\varphi = 120^\circ$. Максимум интенсивности излучения в направлении $\varphi = 70^\circ$ имеет место в третьоктавной полосе с центральной частотой 100 Гц.

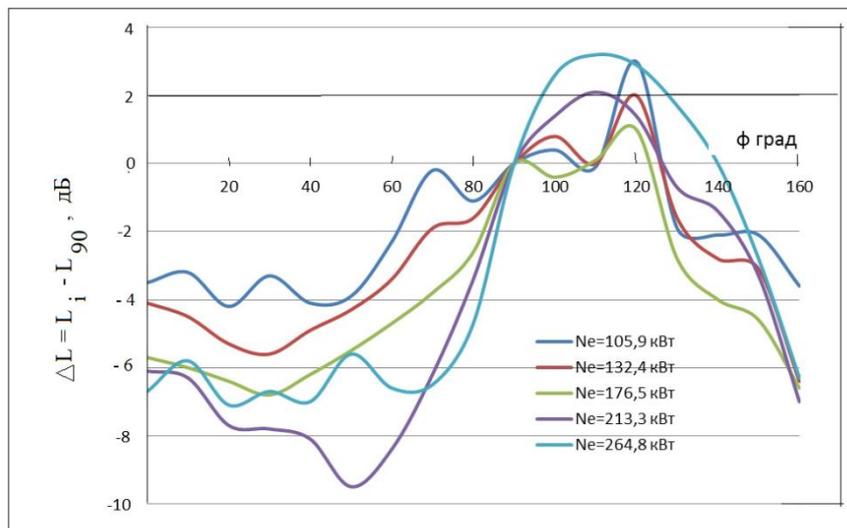


Рисунок 6 – Нормализованная характеристика направленности акустического излучения самолета Як-18Т в статических условиях

При повышенных режимах работы двигателя ($N_e \geq 176,5$ кВт) все характерные составляющие излучения в области низких частот имеют максимум интенсивности в задней полусфере самолета в направлениях $\varphi = 100^\circ - 120^\circ$.

Высокочастотное акустическое излучение с максимальной спектральной плотностью мощности на частоте 10000 Гц имеет максимальную интенсивность в направлениях $\varphi = 100^\circ - 120^\circ$. Это свидетельствует о том, что данное излучение генерируется двигателем.

Зависимость от режима работы СУ суммарной мощности и мощности отдельных составляющих акустического излучения рассмотрена на рисунках 7, где $L_{w\Sigma}$ - уровень мощности суммарного акустического излучения в диапазоне частот 20-10000 Гц, $L_{w1в}$ и $L_{w1д}$ – соответственно уровни мощности первых гармоник шума вращения винта и шума выхлопа двигателя, $L_{w1ш}$ - уровень мощности акустического излучения с широкополосным спектром в области частот 2000 - 10000 Гц. Можно видеть, что зависимости уровней акустической

мощности составляющих шума силовой установки от располагаемой мощности двигателя и от числа Маха относительной скорости потока в концевом сечении лопасти винта носят одинаковый характер. При этом уровни суммарной мощности излучения и уровни мощности 1-й гармоники шума вращения винта сильнее зависят от рассматриваемых параметров (N_e , $M_{отн}$), нежели уровни мощности излучения выхлопа двигателя и излучения в области высоких частот. Сплошные линии на графиках рисунков 7 соответствуют следующим регрессионным уравнениям:

$$L_{w\Sigma} = 107,40796 + 0,193283(N_e) - 2,35587 \times 10^{-4}(N_e^2) \quad (1)$$

$$L_{w\Sigma} = 92,535 + 135,2882(M_{отн}) - 84,0065(M_{отн}^2) \quad (2)$$

$$L_{w1B} = 102,97548 + 0,18(N_e) - 1,81294 \times 10^{-4}(N_e^2) \quad (3)$$

$$L_{w1B} = 89,8624 + 120,944(M_{отн}) - 63,20615(M_{отн}^2) \quad (4)$$

$$L_{w1д} = 121,55036 + 5,11854 \times 10^{-2}(N_e) - 5,238659 \times 10^{-5}(N_e^2) \quad (5)$$

$$L_{w1д} = 118,7158 + 31,35258(M_{отн}) - 15,64358(M_{отн}^2) \quad (6)$$

$$L_{w1ш} = 118,4542 + 5,43728 \times 10^{-3}(N_e) - 5,401698 \times 10^{-5}(N_e^2) \quad (7)$$

$$L_{w1ш} = 119,38 - 8,6435(M_{отн}) - 19,8154(M_{отн}^2) \quad (8)$$

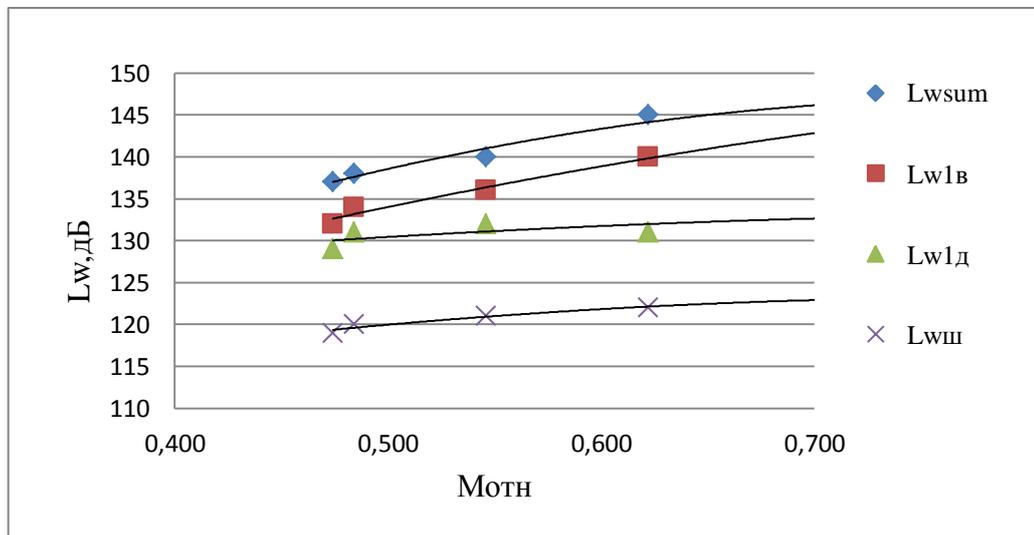


Рисунок 7а - Зависимость мощности акустического излучения от числа Маха относительной скорости потока в концевом сечении лопасти

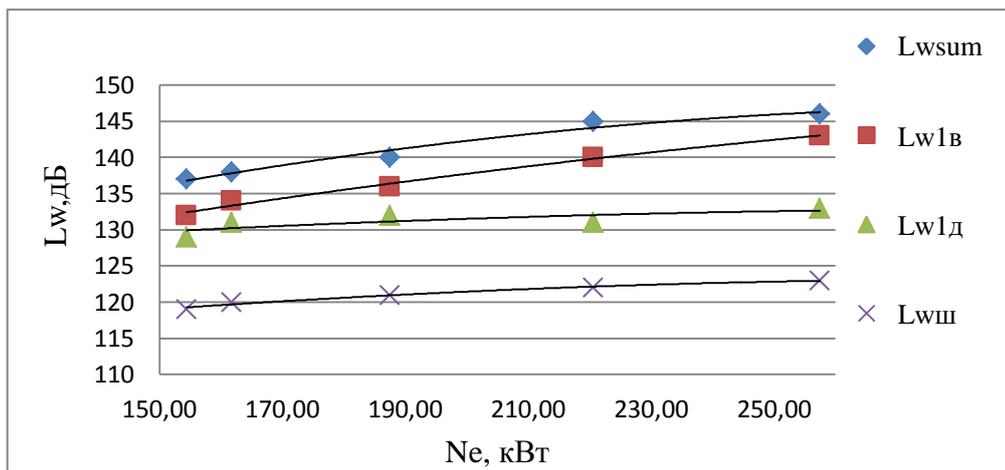


Рисунок 7б - Зависимость мощности акустического излучения от мощности СУ

Экспериментальные данные на рисунках 7 хорошо аппроксимируются представленными соотношениями. Регрессионные уравнения (1) - (8) дают следующую зависимость мощности акустического излучения от механической мощности силовой установки (N_e) и числа Маха относительной скорости потока в концевом сечении лопасти винта.

$$\begin{aligned}
 W_{\Sigma} &\sim N^4, M_{\text{отн}}^5 : \\
 W_{1в} &\sim N^{4,9}, M_{\text{отн}}^5 : \\
 W_{1д} &\sim N^{1,3}, M_{\text{отн}}^{1,8} : \\
 W_{1ш} &\sim N^{1,5}, M_{\text{отн}}^2 .
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Данные соотношения показывают, что суммарная мощность акустического излучения силовой установки самолета Як-18Г определяется шумом вращения воздушного винта, а широкополосное акустическое излучение СУ в области высоких частот ($f > 2000$ Гц) связано с работой двигателя.

Известно [9], что акустическая мощность аэродинамического источника дипольного типа пропорциональна характерной скорости потока в 6-й степени. Поскольку для дозвуковых 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. Полученная для силовой установки самолета Як-18Т экспериментальная зависимость мощности суммарного акустического излучения от характерной скорости обтекания лопастей винта в 5-й степени свидетельствует о том, что в суммарном акустическом излучении силовой установки помимо винта заметную роль играет и двигатель.

Акустико-механический коэффициент для силовой установки самолета Як-18Т при уровне механической мощности 350 л.с., показывающий соотношение между мощностью акустического излучения и механической мощностью силовой установки самолета, составляет $\approx 0,15\%$.

Заключение

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы. Основным источником гармонического шума силовой установки легкого винтового самолета является воздушный винт, а широкополосное излучение в области высоких частот связано с работой двигателя. Наличие жесткой поверхности вблизи винта, расположенной нормально к плоскости диска, при относительно малых значениях клиренса вызывает появление у винта интенсивного акустического излучения импульсного типа. Мощность акустического излучения силовой установки самолета Як-18Т в статических условиях определяется мощностью суммарного акустического излучения воздушного винта и двигателя. Акустический КПД силовой установки самолета Як-18Т в стационарных условиях составляет $\approx 0,15\%$.

Библиографический список

1. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к конвенции о международной гражданской авиации. Том 1. Авиационный шум. Издание шестое, Июль 2011
2. Л.Я. Гутин О звуковом поле вращающегося винта. ЖТФ, 1936, т.6, № 5.
3. Л.Я.Гутин О звуке вращения воздушного винта. ЖТФ, 1942, т.12, вып.2-3.
4. I.E Garrick., C.E. Watkins A theoretical study of the effect of forward speed of the free space. Sound pressure field around propellers. NACA, 1954, Report 1158.
5. M.V. Lowson The sound field for singularities in motion. Proc. R. Soc.(London), 1965, ser.A, v.286, №1407.

6. А.Г.Мунин, В.Ф.Самохин, Р.А. Шипов и др. Авиационная акустика, т.1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов. Под ред. А.Г.Мунина. М. Машиностроение, 1986.
7. В.Ф. Самохин Об одном подходе к расчету дальнего акустического поля воздушного винта. Труды ЦАГИ, 1988, вып.2355, стр.65-75.
8. Г. Лэмб Гидродинамика. М., Гостехиздат, 1947
9. Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. Введение в нелинейную акустику. Изд-во «Наука». Гл. ред. физ.мат.лит-ры. М., 1966.

Сведения об авторах

Самохин Валерий Федорович, главный научный сотрудник Центрального аэрогидродинамического института имени проф. Н.Е.Жуковского, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

Ул. Радио, 17; Москва, 105005; тел.:(495) 916-90-14; e-mail: samohin_vf@mail.ru

Мошков Петр Александрович, инженер Центрального аэрогидродинамического института имени проф. Н.Е.Жуковского, тел.:8-925-375-97-97, e-mail: moshkov89@bk.ru