

ШУМ ВИНТА

Задача расчета и снижения шума винтов наиболее актуальна в гражданской авиации и в судостроении.



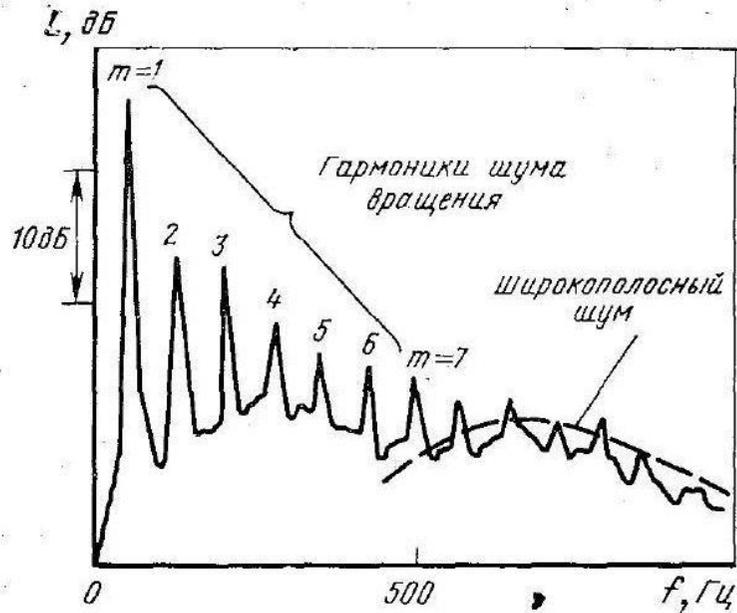
Основные составляющие шума винта:

- 1) «Объемный» шум, обусловленный вытеснением среды при движении лопасти конечного объема (монопольный источник), спектр дискретный с гармониками, имеющими частоты, кратные «лопастной» частоте: $f_m = mN\Omega$, где m – номер гармоники, N – число лопастей, Ω – число оборотов винта в секунду; частота $N\Omega$ называется лопастной (обычно у винтовых самолетов она составляет от 50 до 100 Гц, т.е является сравнительно низкочастотной, что затрудняет снижение шума винтов).
- 2) «Силовой» шум, вызванный силовым воздействием лопасти на среду при вращении винта (даже при бесконечно тонкой лопасти «силовой» шум будет возникать при конечной тяге винта) (дипольный источник), спектр дискретный с гармониками, имеющими частоты, кратные лопастной частоте: $f_m = mN\Omega$;

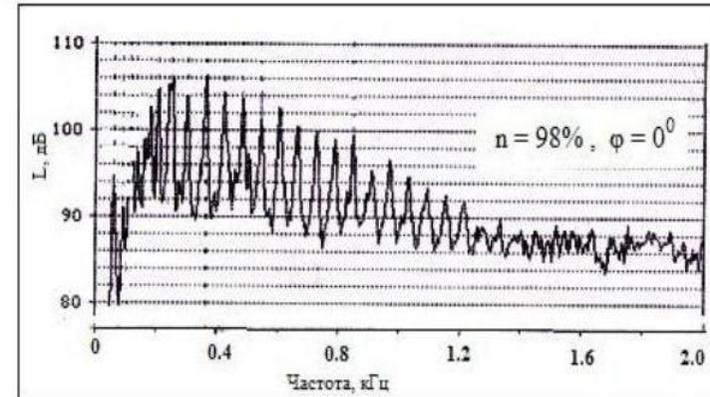
Объемный и силовой шум имеют четко выраженный дискретный спектр, вместе они называются шумом вращения винта.

- 3) Вихревой шум, вызванный срывом вихрей с лопастей при их вращении и образованием вихревой пелены за лопастями (преобладают дипольные составляющие), спектр широкополосный и более высокочастотный в сравнении с шумом вращения, по последней причине вихревой шум слышен лишь на небольшом расстоянии от винта; уровень вихревого шума, как правило, на 10-20 дБ ниже уровня гармоник шума вращения, а максимум его спектра сдвинут в сторону более высоких частот.

Таким образом, спектр шум винта представляет собой суперпозицию дискретного низкочастотного спектра шума вращения и сплошного широкополосного высокочастотного вихревого шума.



Спектр шума винта в узких полосах частот ($\Delta f = 5$ Гц)



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

Кроме указанных трех основных источников шума винта, выделяют и другие источники шума, которые могут быть существенными или даже доминирующими в некоторых случаях:

- 4) при полете в неоднородной атмосфере возникает дополнительный шум, обусловленный флуктуациями скорости ветра и плотности воздуха, а также вибрациями лопастей из-за этих неоднородностей среды;
- 5) «ударный» шум, вызванным скачками уплотнения и ударными волнами и их колебаниями при движении концов лопастей со скоростями, близкими к скорости звука или превышающими её (положение скачков уплотнения при околосвуковых скоростях является весьма неустойчивым);
- 6) «импульсный» шум, возникающий при прохождении лопастей вблизи элементов конструкции самолета (судна) или при прохождении через турбулентный след за ними;
- 7) кавитационный шум судовых винтов, обусловленный кавитацией при больших перепадах давления на лопастях;
- 8) «пение» судовых винтов, обусловленное вибрацией лопастей при срыве вихрей с них.

Значительное усиление шума винта может наблюдаться при срыве потока с лопастей при больших углах атаки лопасти (например, на взлётном режиме при малой скорости движения самолета, а также при малых окружных скоростях лопастей). Уровень шума винта в таких случаях может увеличиваться на 10-15 дБ по сравнению со случаем безотрывного обтекания (см. рис., где U_R – окружная скорость лопасти, т.е. линейная скорость конца лопасти). По мере роста скорости самолета углы атаки лопастей уменьшаются и срыв потока обычно прекращается. Проблему отчасти решает изменение шага винта.

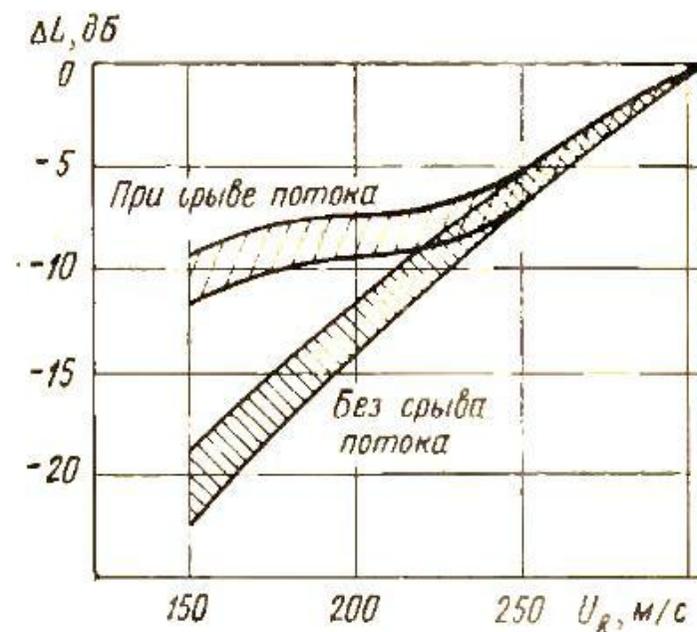


Рис. 2. 49. Влияние срыва потока с лопастей винта на уровень шума при работе на месте

Теория шума вращения винта впервые была создана в СССР Л.Я.Гутиным. Основная идея этой теории – связь характеристик шума винта с суммарными (общими) характеристиками винта: тягой, крутящим моментом на валу, числом лопастей, числом оборотов и диаметром винта. Для описания излучения звука элементом лопасти Гутин рассмотрел при некоторых упрощающих предположениях силы, действующие на

элементарный участок лопасти (площадку) $rdrd\theta$ (силу тяги винта dP_e и силу dQ , обусловленную крутящим моментом винта), учёл периодичность воздействия этих сил на среду (разложение в ряд Фурье по гармоникам лопастной частоты), получил выражения для составляющих сил по всем осям (непрерывное распределение аэродинамических сил по лопасти было заменено на сосредоточенную силу, точка приложения которой находится на расстоянии «эффективного радиуса винта» R_3 от оси вращения, R_3 подбирается по результатам сравнения расчетного шума с экспериментом; обычно $R_3 \approx 0,7 \div 0,8 \cdot R$, где R – радиус винта), и определил скалярный потенциал звукового поля (по формуле Лэмба). Не воспроизводя этот вывод из-за громоздкости, приведем лишь окончательные выражения.

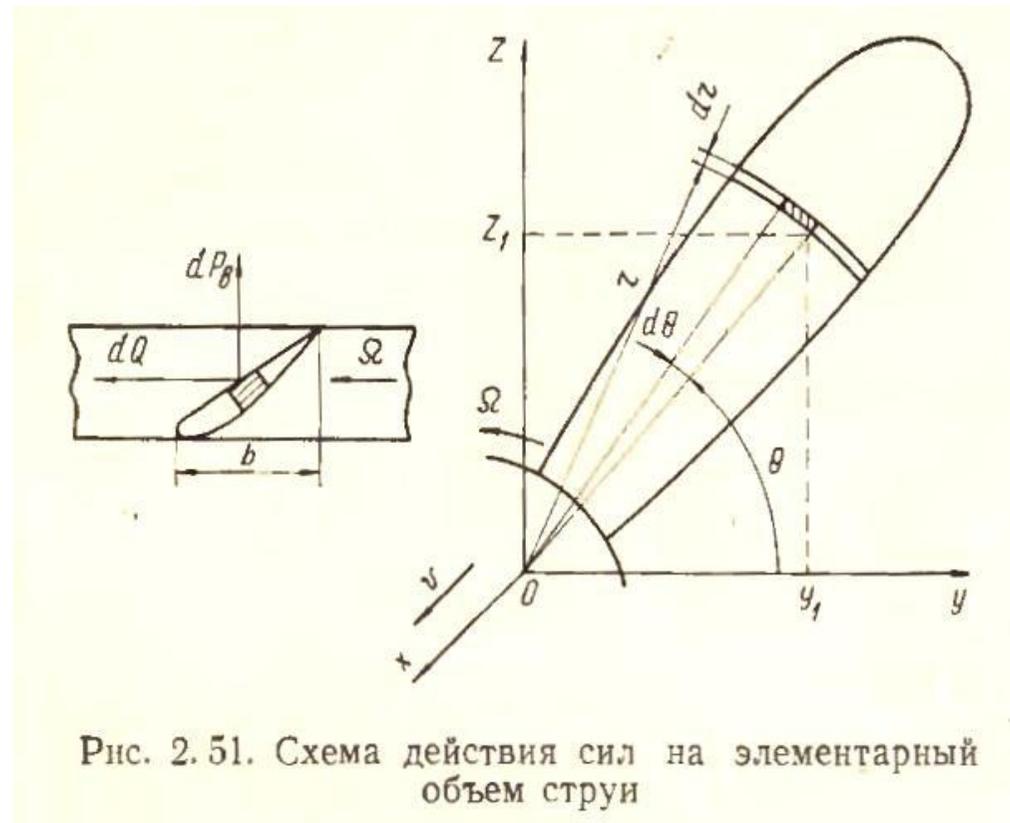


Схема действия сил, создаваемых элементарным участком лопасти

Выражение, полученное для амплитуды m -й гармоники звукового давления «силового» шума винта в дальнем поле, имеет вид:

$$P_m = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \approx \frac{mn\omega}{2\pi c_0 L_1} \left| -P_B \cos \vartheta + \frac{c_0 M_{кр}}{\omega R_э} \right| J_{mn} \left(\frac{mn\omega}{c_0} R_э \sin \vartheta \right),$$

где L_1 — расстояние от центра вращения винта до наблюдателя; J_{mn} — функция Бесселя первого рода; P_B — тяга винта; $M_{кр}$ — крутящий момент; $R_э$ — эффективный радиус.

Для m -й гармоники звукового давления с учётом «объемного» шума в дальнем поле получено следующее выражение:

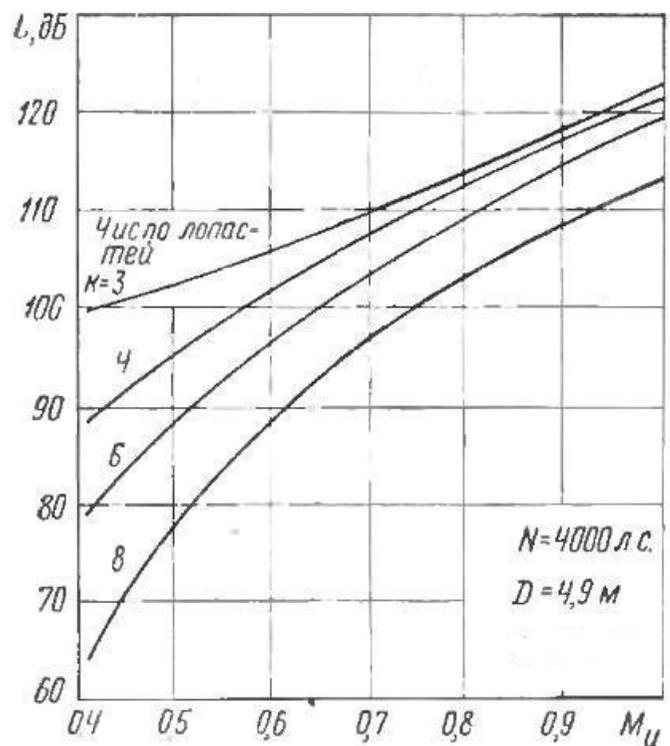
$$P_m = \frac{mn\omega}{2\pi c_0 L_1} \left\{ \left[-P_B \cos \vartheta + \frac{c_0 M_{кр}}{\omega R_э^2} \right] J_{mn} \left(\frac{mn\omega}{c_0} R_э \sin \vartheta \right) - \right. \\ \left. - i \rho c_0^{\omega} V_{л} J_{mn} \left(\frac{mn\omega}{c_0} R_{л} \sin \vartheta \right) \right\}, \quad (2.103a)$$

где $V_{л}$ — объем лопастей винта; $R_{л}$ — эффективный радиус при определении «объемного» шума. Приближенно можно принять $R_{л} \approx R_э$.

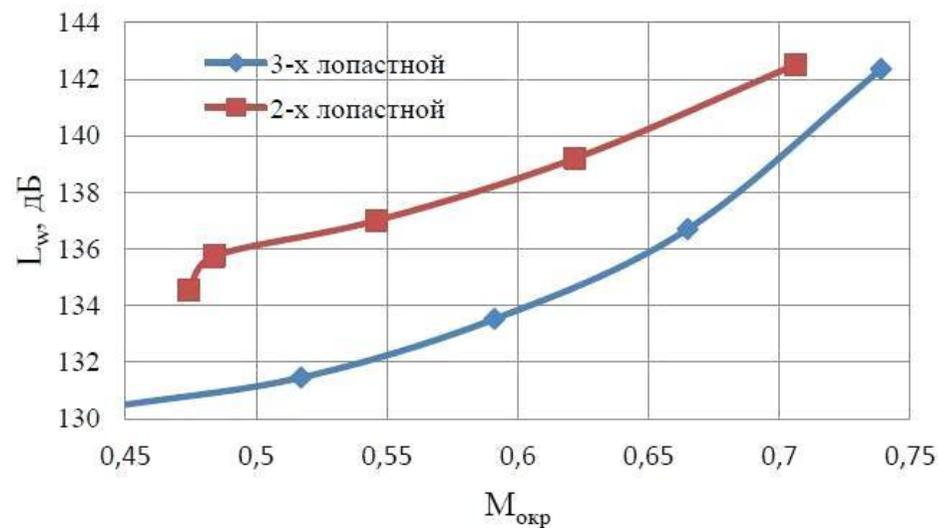
Поскольку в шуме винта обычно доминирует силовой шум (дипольного характера), то можно было бы ожидать его зависимости от скорости V^6 , однако реально наблюдается зависимость, близкая к V^6 , что обусловлено более сложным характером источника шума, чем в простой акустической модели винта.

Впоследствии другие варианты теории шума винта были предложены Непомнящим, Эрнстхаузенем и Вильмсом, Фокс-Вильямсом и др. В последнее время применяются довольно сложные вычислительные методы. Тем не менее, в большинстве случаев теории шума винта приводят к «драматическим» расхождениям с экспериментом (например, теория Гутина дает нулевую интенсивность излучения по оси винта, что видно из приведенной формулы), поэтому на практике для расчета шума винта пользуются эмпирическими соотношениями.

Важным результатом расчетов является зависимость шума винта от числа лопастей и окружной скорости лопастей (окружная скорость – это линейная скорость конца лопасти, окружное число Маха – соответственно отношение этой скорости к скорости звука):



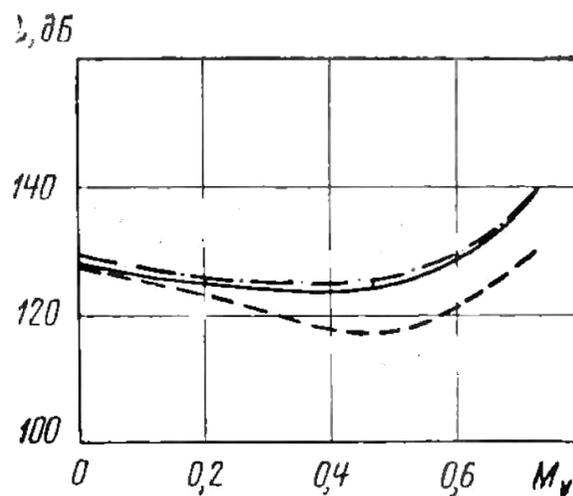
Влияние числа лопастей и окружного числа M_u на уровень звукового давления (расчет)



Сравнение измеренных суммарных уровней звуковой мощности самолёта Як-18Т с двух- и трёхлопастными винтами в зависимости от числа Маха окружной скорости

(наземный эксперимент)

По мере роста скорости полета шум винта сначала снижается примерно до числа M полета 0,5, а далее повышается, т.е. имеется некоторая оптимальная по шуму скорость полета, близкая к числу Маха полёта $M=0,5$:



Зависимость уровня звукового давления первой гармоники шума вращения от числа M_v полета

Основные методы снижения шума винта:

- 1) Увеличение числа лопастей и снижение концевой скорости лопастей;
- 2) Применение «саблевидных» лопастей, т.е. изменение конфигурации и изгиб оси лопастей по размаху (на недорогих самолетах не применяется из-за сложности и дороговизны производства);
- 3) Применение суперкритических профилей лопастей, снижающих критические скорости (волновой кризис) на лопастях и уменьшающих ударный шум;

Эти методы были реализованы при создании **винтовентиляторов** – нового класса воздушных винтов.

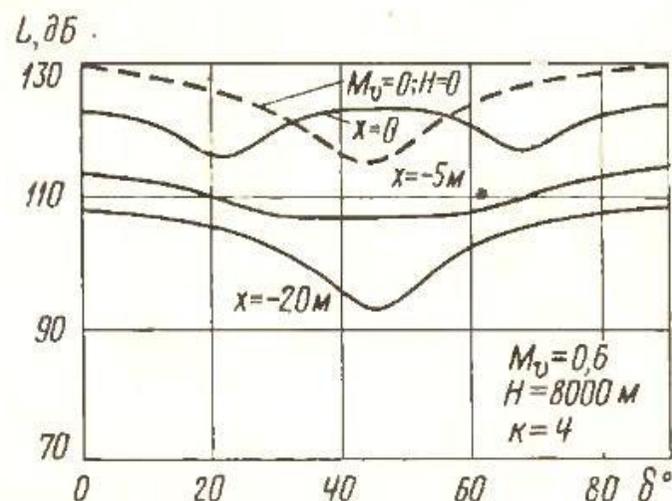


Современный винт с увеличенным числом лопастей и небольшой саблевидностью - самолет А400



Винтовентиляторы – самолет Ан-70

4) Шум относительно небольших винтовых самолетов, имеющих 2-4 винтовых двигателя, снижают также методом синхрофазирования винтов (жесткая синхронизация угловой скорости вращения винтов и подбор такой разности фаз вращения винтов, при которой в объеме кабины экипажа и салона самолета возникает интерференционный минимум шума на дискретной частоте, соответствующей максимуму спектра). Важно, что метод эффективен для низких частот, которые трудно подавить в салоне методами звукоизоляции и звукопоглощения. Однако в длинных самолетах и самолетах с широким фюзеляжем в некоторых частях самолета шум может даже увеличиться (интерференционный максимум).



Изменение уровня звукового давления первой гармоники шума вращения на земле и в полёте на эшелоне в зависимости от угла δ между лопастями двух 4-лопастных винтов (вдоль оси самолета: $x=0$ соответствует плоскости вращения винтов, $x=-20$ м – хвостовой части фюзеляжа)

5) Использование специальных видов винтов (например, винт в кольце).

Шум винтовых самолетов на местности может быть меньше, чем шум турбореактивных, однако внутри самолета он, как правило, больше, причем его спектр более низкочастотный, что создает проблемы внутренней акустики винтового самолета (большой вес звукоизолирующих материалов, трудности снижения низкочастотного шума, высокие уровни шума и вибрации в плоскости вращения винтов, вынужденное применение активных систем шумоподавления в салоне и др.).