УДК 534.83:629.735.45

# О ВЛИЯНИИ СЖИМАЕМОСТИ НА ШУМ ВЫТЕСНЕНИЯ ОТ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

# Б.С. КРИЦКИЙ, Р.М. МИРГАЗОВ, А.А. НИКОЛЬСКИЙ

Рассмотрена задача генерации шума несущим винтом, обусловленная толщиной его лопастей – шум вытеснения или объемный шум. Описывается методика расчета шума вытеснения, которая основана на линейной акустической теории с учетом изменения эффективной толщины лопасти во времени вследствие сжимаемости потока.

Ключевые слова: вертолет, несущий винт, шум вытеснения, лопасть, уровень звукового давления, сжимаемость.

#### Введение

Повышение экологической безопасности перспективных и модернизируемых отечественных вертолетов при их гражданском и военном применении и минимизация шумоизлучения имеют большое значение. Снижение демаскирующего фактора вертолетов при их военном применении и ужесточение требований ИКАО к уровню шума летательных аппаратов при их гражданском использовании требуют исследования акустического воздействия несущего винта вертолета в дальнем поле. Поэтому целесообразно на этапах предварительного проектирования несущего винта оценивать параметры шумоизлучения винта и принимать специальные меры по снижению его уровня.

Среди различных видов шума, генерируемых несущим винтом вертолета, отдельно выделяют шум, обусловленный толщиной лопастей винта – шум вытеснения или объемный шум, который наиболее интенсивен при больших числах Маха. При возрастании числа Маха на концевой части наступающей лопасти несущего винта до M = 0,85 и более несущий винт начинает издавать резко направленный вперед шум в виде узких пиков разрежения, следующих с частотой прохождения лопастей. Субъективно такое звуковое излучение воспринимается как весьма неприятные удары. Исследования показывают [1], что указанный шум вызван вытесняющим эффектом обтекания лопасти, связанным с наличием у нее конечной толщины. При этом имеют значение как сама физическая толщина лопасти, так и аналогичный по действию нелинейный эффект околозвукового обтекания ее концов. В работе [2] исследовалось только влияние физической толщины лопасти на шум вытеснения. Такой подход представляется оправданным при приближенной оценке акустических характеристик несущего винта. В данной работе приводится методика расчета шума вытеснения с учетом изменения эффективной толщины лопасти во времени вследствие сжимаемости потока.

#### О методике расчета звукового давления, обусловленного толщиной лопасти

Рассматривается движение втулки винта с постоянной скоростью V, которая приходит к моменту t в начало осей координат OXYZ (рис. 1). Линейная акустическая теория приводит к следующему выражению для вызванного толщиной лопасти h(x,r) акустического давления в момент t в точке  $M_p(x_p,y_p,z_p)$  дальнего поля несущего винта [3]

$$p(\overline{\Psi}) = -\frac{\rho a^2 M_k^2}{4\pi (l_*/R)} (\frac{a}{a_{np}})^3 \int_0^1 d\vec{r} \int_{x_1}^{x_2} h(x, \bar{r}) \delta(\overline{\Psi} + \frac{x}{r}) dx .$$
(1)

Здесь  $\bar{r} = r/R$  – относительный радиус сечения; х – координата вдоль хорды, отсчитываемая в направлении от носика к хвостику. Параметр  $\bar{\Psi}$  играет роль безразмерного времени и связан с обычным азимутальным углом лопасти  $\Psi = \omega t$  соотношением



$$\Psi = \overline{\Psi} + \frac{\omega}{a} \mathbf{l}_* + \varphi + \frac{3}{2}\pi.$$
<sup>(2)</sup>

Рис. 1. К постановке задачи

Через l\* в (1) и (2) обозначено расстояние от точки  $M_p(x_p, y_p, z_p)$  до центра втулки несущего винта в расчетный момент времени

$$l_* = (-B + \sqrt{B^2 + AC}) / A.$$

Здесь  $A = 1 - M_x^2 - M_y^2$ ;  $B = x_p M_x - y_p M_y$ ;  $C = x_p^2 + y_p^2 + z_p^2$ , причем  $M_x = V_x / a$ ;  $M_y = V_y / a$  – отношения тангенциальной  $V_x$  и нормальной к диску винта  $V_y$  компоненты скорости движения вертолета к скорости звука а. Помимо скорости звука а, в формулу (1) входит еще и "приведенная" скорость  $a_{np}$ 

$$a_{np} = a + V_x \cos\beta \cos\phi - V_y \sin\beta,$$

где углы  $\beta$  и  $\phi$  определяются соотношениями  $\sin\beta = \frac{(y_p + l_*M_y)}{l_*}; \cos\beta = \sqrt{1 - \sin^2\beta};$ 

 $\sin \varphi = \frac{z_p}{l_* \cos \beta}; \ \cos \varphi = \frac{(x_p - l_* M_x)}{l_* \cos \beta}.$ 

Входящая в (1) функция  $\delta(\overline{\Psi} + \frac{x}{r})$  определяется через параметр 9

$$\delta(\vartheta) = \frac{1}{\left(1 - u\cos\vartheta\right)^4} \left[ u\cos\vartheta - \frac{3u^2\sin^2\vartheta}{1 - u\cos\vartheta} \right],$$

связанный с  $\overline{\Psi}$  и х уравнением

$$\vartheta - u\sin\vartheta = \Psi_{\Sigma},\tag{3}$$

где  $\overline{\Psi}_{\Sigma} = \overline{\Psi} + x/r$ ;  $u = u_k \overline{r}$ ;  $u_k = \frac{\omega R \cos \beta}{a_{np}}$ . Входящее в (1) концевое число Маха равно

 $M_k = \omega R / a$ . Через h(x,r) в (1) обозначено расстояние между точками верхней и нижней поверхностей лопасти, отсчитываемое по нормали к плоскости диска винта.

Перейдя к переменной интегрирования 9 во внутреннем интеграле (1), получим

$$p(\overline{\Psi}) = -\frac{\rho a^2 M_k^2}{4\pi (l_*/R)} (\frac{a}{a_{np}})^3 \int_0^1 \vec{r} d\vec{r} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{h(x, \vec{r})}{R} \frac{u \cos \vartheta (1 + 2u \cos \vartheta) - 3u^2}{(1 - u \cos \vartheta)^4} d\vartheta.$$
(4)

Пределы интегрирования  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  в (4) определяются уравнениями:

$$\begin{array}{l}
\vartheta_1 - u\sin\vartheta_1 = \Psi + x_1/r; \\
\vartheta_2 - u\sin\vartheta_2 = \overline{\Psi} + x_2/r.
\end{array}$$
(5)

Входящая в h(x, r) переменная x определяется в зависимости от угла  $\vartheta$  выражением

$$\mathbf{x} = 2(\vartheta - \mathbf{u}\sin\vartheta - \Psi). \tag{6}$$

Наличие явной зависимости (6) переменной х от 9 избавляет от решения уравнения (3) на каждом шаге интегрирования при использовании выражения (1), что на порядок ускоряет процесс вычисления.

При численных расчетах толщина лопасти h задавалась двумерными таблицами для ряда значений радиуса и координаты х (рис. 3).

Значение h в текущей точке (x, r) определялось посредством линейной интерполяции. Интегралы вычислялись при равномерном разбиении по x и r с использованием формулы прямоугольников. Следует отметить, что уравнение (6) имеет единственное решение относительно 9 лишь при u < 1, что соответствует нормальным дозвуковым скоростям сечения лопасти. При u > 1 приведенные формулы непригодны.

## Учет сжимаемости потока в методике расчета

Исследования шума вытеснения несущего винта [1; 2] показывают, что линейный подход к задаче генерирования звуковых волн, вызываемых толщиной лопасти, занижает их интенсивность. Одна из причин этого – существенная нелинейность трансзвукового течения в окрестности конца лопасти. Расчет поля скоростей трансзвукового обтекания профиля позволяет уточнить теорию в рамках схемы плоских сечений. Задача может быть приведена к виду линейной, но с использованием дополнительной эффективной акустической толщины профиля  $\Delta h(x,z,t)$ , добавляемой к ее физической толщине h(x,z), входящей в уравнение (1), то есть  $h(x,z,t) = h(x,z) + \Delta h(x,z,t)$ .

Поэтому точное рассмотрение околозвукового шума вытеснения несущего винта требует изучения поля скоростей в окрестности концов лопастей при их околозвуковом обтекании. Если поле скоростей  $u_x(x,y,z,t)$  такого обтекания найдено, то его можно преобразовать в эффек-

тивную дополнительную толщину  $\Delta h_{\ni}(x, z, t) = \frac{\kappa + 1}{2a^2} \int u_x^2(x, y, z, t) dy$ , где ось x направлена

вдоль хорды; z – вдоль лопасти; к – отношение теплоемкостей газа; a – скорость звука. Для расчета поля скоростей достаточно использовать модель вязко-невязкого взаимодействия. Эффективная толщина в отличие от физической существенно зависит от условий обтекания, то есть от азимута и радиуса сечений лопасти. Подсчет эффективной толщины на основе схемы плоских сечений требует, таким образом, предварительного расчета нагрузок лопасти. Кроме этого, необходимо произвести расчеты соответствующих полей скоростей при трансзвуковом обтекании профиля лопасти при этих нагрузках и подсчитать по ним эффективные толщины.

# Некоторые результаты расчета

В данной работе проведен расчет эффективных акустических толщин для профиля NACA 0012 в диапазоне чисел Маха 0,7 < M < 0,9. Получена сетка эффективных толщин для данного профиля как функции коэффициента подъемной силы профиля с<sub>уа</sub>, числа Маха и координаты х, направленной вдоль хорды профиля (рис. 2). Построенные таким образом сетки являются универсальными аэродинамическими характеристиками профиля, и по ним далее могут производиться расчеты эффективных толщин для любых распределений нагрузок.



**Рис. 2.** Изменение эффективной толщины профиля NACA 0012 по хорде в зависимости от коэффициента подъемной силы и числа Маха

По этой сетке рассчитана интенсивность шума вытеснения несущего винта вертолета Белл UH-1H, и произведены сравнения с имеющимися для него экспериментальными данными [4].

В расчетах определялись величины звукового давления в направлении максимального звукового излучения, вызванного толщиной лопасти, в вертикальной и горизонтальной плоскостях, которые были также определены в летном эксперименте [5]. В эксперименте вертолет Белл UH-1H летел в установившемся горизонтальном полете за самолетом OV-1C, над килем которого был установлен микрофон. Расстояние между втулкой несущего винта и микрофоном составляло  $1 = 3R \approx 29$  м, относительная скорость полета вертолета  $\overline{V} = V_{\omega R}^{\prime} = 0,265$ . На рис. 3 проведено сопоставление результатов расчета по изложенной методике с данными летного эксперимента [4]. Как в расчете, так и в эксперименте, кривые представляют пиковые значения звукового давления. Здесь  $M_{\kappa} = (\omega R + V_x)/a - суммарное число Маха конца наступающей лопасти. Параметры полета и характеристики лопасти несущего винта были следующими: радиус винта <math>R = 7,315$  м; хорда лопасти b = 0,533 м; профиль лопасти NACA 0012, окружная скорость винта  $\omega R = 248$  м/с; скорость полета менялась в диапазоне  $V_x = 45-70$  м/с. Кривая, полученная по экспериментальным данным, отражает суммарный отрицательный пиковый вклад всех составляющих шума вертолета, а кривая, полученная в расчете, показывает величину мгновенного пикового звукового давления, обусловленного только вытесняющим эффектом

лопасти. Из графика следует, что расчетные значения пиков звукового давления по данной методике, обусловленные вытесняющим эффектом лопасти, составляют 70-75% от экспериментальных значений на наступающей лопасти и, вероятно, с увеличением концевых чисел Маха шум вытеснения становится преобладающим.



Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов по максимальному уровню шумоизлучения (рис. 3) и по диаграмме направленности в горизонтальной плоскости (рис. 4) и в вертикальной плоскости (рис. 5).



**Рис. 4.** Диаграммы направленности в горизонтальной плоскости



Рис. 5. Диаграммы направленности в вертикальной плоскости

Следует отметить, что в эксперименте [4], результаты которого приведены на рис. 3-5, измерялись все виды шума, а в расчетах получен только шум вытеснения.

Учет дополнительных источников повлияет только на уровень звукового давления, что приведет к его увеличению в 1,1-1,3 раза в зависимости от режима полета. Особенно это актуально для высокоскоростных режимов, где эта поправка может достигать существенных величин (порядка 25-30%) от общего значения уровня звукового давления. Характер диаграммы направленности звукового давления при учете "эффективной" толщины лопасти не изменится.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Джонсон У. Теория вертолета. М.: Мир, 1983. Т. 2. 1022 с.

**2.** Головкин В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М. О расчете шума вытеснения несущего винта, вызванного толщиной лопасти // Ученые записки ЦАГИ. 2010.Т. XLI. № 5. С. 3-12.

**3. Баскин В.Э.** Акустическое давление, вызываемое винтом вертолета при горизонтальном полете // *Труды* ЦАГИ. 1972. Вып. 1373.

**4. Schmitz F.H., Boxwell D.A.** In-Flight Far-field Measurement of Helicopter Impulsive Noise. 32nd Annual National Forum AHS Preprint. 1976. № 1062.

# THE EFFECT OF COMPRESSIBILITY FOR DISPLACEMENT NOISE FROM THE HELICOPTER ROTOR

#### Kritskiy B.S., Mirgazov R.M., Nikolskiy A.A.

The problem of noise generation of rotor due to the thickness of blades - displacement noise is considered. The method of calculating the displacement noise, which is based on linear acoustic theory for the changes in the effective thickness of the blade over time due to the compressibility of the flow are described.

Keywords: helicopter, rotor, displacement noise, blade, sound pressure level, compressibility.

#### REFERENCES

1. Dzhonson U. Teoriya vertoleta. M.: Mir. 1983. T. 2. 1022 p. (In Russian).

2. Golovkin V.A., Krickiyj B.S., Mirgazov R.M. O raschete shuma vytesnenija nesushhego vinta, vyzvannogo tolshhinoj lopasti. Uchenihe zapiski CAGI. 2010. V. XLI. № 5. Pp. 3-12. (In Russian).

**3. Baskin V.Eh.** Akusticheskoe davlenie, vyzyvaemoe vintom vertoleta pri gorizontal'nom polete. *Trudih CAGI*. 1972. Issue 1373. (In Russian).

**4. Schmitz F.H., Boxwell D.A.** In-Flight Far-field Measurement of Helicopter Impulsive Noise. *32nd Annual National Forum AHS Preprint*. 1976. № 1062.

#### Сведения об авторах

Крицкий Борис Сергеевич, 1949 г.р., окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (1976), профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, автор более 160 научных работ, область научных интересов – численные методы в аэрогидродинамике, аэродинамика и аэроакустика винтокрылых летательных аппаратов.

**Миргазов Руслан Минхатович,** 1979 г.р., окончил МФТИ (2002), кандидат технических наук, начальник сектора ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, автор более 30 научных работ, область научных интересов – численные методы и их алгоритмическая реализация, аэродинамика и акустика несущего винта.

**Никольский Александр Александрович,** 1951 г.р., окончил МФТИ (1974), доцент, кандидат физико-математических наук, начальник сектора ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, автор более 30 научных работ, область научных интересов – численные методы в аэрогидродинамике, аэродинамика винтокрылых летательных аппаратов.